



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

**DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE
DIFUSIÓN DE HUMEDAD EN PAPELES
AISLANTES DE TRANSFORMADOR**

Autor:

D. Diego Fernando García Gómez

Directores:

Dra. D.^a María Belén García de Burgos

Dr. D. Juan Carlos Burgos Díaz

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Leganés, mayo 2012

TESIS DOCTORAL

DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD EN PAPELES AISLANTES DE TRANSFORMADOR

Autor: Diego Fernando García Gómez

Directores: Dra. D^a María Belén García de Burgos
Dr. D. Juan Carlos Burgos Díaz

Firma del tribunal calificador.

Presidente:	Nombre	_____
Vocal:	Nombre	_____
Vocal:	Nombre	_____
Vocal:	Nombre	_____
Secretario:	Nombre	_____

Calificación:

Leganés, 22 de mayo de 2012

«Puede ser un héroe lo mismo el que triunfa que el que sucumbe, pero jamás el que abandona el combate. Quizá ganen los impertinentes medio mundo, pero los constantes poseen el mundo entero».

Thomas Carlyle

Agradecimientos

En el final de este camino he de recordar y agradecer a todas aquellas personas que durante esta travesía han dado pasos a mi lado, brindándome apoyo, consejo, buenos momentos y ante todo su amistad. Por ello he de decir que soy un hombre afortunado.

Afortunado por contar con unos magníficos tutores quienes más que guía en lo técnico y en lo científico, han sido amigos, brindándome su apoyo incondicional. A Belén y Juan Carlos, mi infinita gratitud.

Agradecimiento especial a los hermanos Gonzalez y su familia, quienes han sido como una familia para la mía propia. A Carlos por su apoyo desinteresado incluso antes de iniciar este periplo. A Javier con quién compartí muchas horas de trabajo, y cuyo compromiso y dedicación han hecho posible culminar con éxito esta etapa.

A quienes brindaron su ayuda para sacar adelante los montajes experimentales Fernando Serrano, Carlos Valdivia y Ángel Gómez, apoyo invaluable para llegar a este momento.

Quiero hacer especial mención a los profesores del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Néstor García, Domingo Santana, Javier Villa y Ulpiano Ruiz-Rivas. Consejos valiosos, apoyos oportunos y confianza. Esta última en especial permitió que usásemos parte de sus equipos e instalaciones de manera irrestricta. Por todo ello, gracias.

En el mismo sentido quiero agradecer a la profesora Bernarda Serrano del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química por su ayuda para la realización de parte de los ensayos químicos reportados en esta tesis.

Un agradecimiento especial a José Antonio Almendros de la Universidad de Castilla la Mancha. Su trabajo preliminar con el grupo se constituyó en punto de partida de esta tesis doctoral. Recuerdo que en los primeros días, en una reunión con él en Albacete, nos indicó cual debería ser el objetivo de la tesis y al cabo de este tiempo hemos de decir que tenía razón en ello.

Quiero dar las gracias también a Henry Laniado y Dalia Valencia del Departamento de Estadística por su apoyo en el procesamiento y posterior análisis estadístico de los resultados de las optimizaciones.

Agradezco a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica: Edwin, Gloria, Ignacio, Jaime, Jorge A., Jorge V., Lucía, Miguel M. y familia, Miguel S., Miriam, Mónica, Rafael, y en especial a Ricardo y Sandra con quienes he compartido algo más que despacho durante este tiempo. A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica y por supuesto a Eva. Como suelo ser muy olvidadizo, si se me escapa algún nombre, ruego me disculpen por ello.

A mis compañeros de Univalle, Guillermo, Héctor, Carlos, Ferley, Echeverry, Gladys y Eduardo. Su apoyo y confianza en mí, me impulsaron a esta aventura. No defraudar esa confianza ha sido siempre un aliciente para recorrer este camino.

Muy afortunado también por el apoyo incondicional de mi familia a quienes agradezco de manera especial. Mi esposa Betty y mi hija Ada Salomé quienes han hecho grandes concesiones, perdiendo durante muchos días y noches, por sustracción mental y corporal, al esposo y al padre, solo para que este objetivo sea hoy una realidad. Betty recuerdo también que superaste, aunque sea momentáneamente, tu fobia a volar, sé que ese ha sido lo más difícil para ti, por ello gracias. A Salomé porque tú amor de hija es mi razón de vida. ¡Gracias!

...Por supuesto a Dios y a los Ángeles.

Resumen

El transformador de potencia es uno de los activos imprescindibles en la operación de los sistemas de generación y transmisión de energía eléctrica, siendo a la vez uno de los equipos más costosos de estos sistemas. Los transformadores de potencia son los encargados de elevar el nivel de tensión de la energía en las estaciones de generación para reducir así las pérdidas en su transporte, así como de reducir la tensión a valores adecuados en los puntos de consumo.

La fiabilidad de los transformadores de potencia es esencial para una adecuada operación del sistema eléctrico de potencia. La mayoría de las causas de fallo en los transformadores están relacionadas con su aislamiento eléctrico. En transformadores de grandes y medianas potencias, el aislamiento eléctrico está compuesto principalmente de celulosa (papel Kraft y cartón prensado) y aceite.

El agua es uno de los agentes más dañinos para los transformadores de potencia, ya que su presencia acelera el envejecimiento de los aislamientos, reduce su margen dieléctrico y disminuye la tensión de iniciación de las descargas parciales. Todas estas condiciones incrementan la probabilidad de aparición de fallos inesperados en el transformador.

El comprender y estimar de manera adecuada la dinámica de la humedad en los aislamientos del transformador de potencia es esencial para mejorar los procesos de fabricación, operación y mantenimiento de estos equipos. La dinámica de la humedad en el interior de los aislamientos celulósicos puede ser estimada mediante un modelo matemático de difusión basado en la segunda ley de Fick. El parámetro básico de este modelo matemático es el denominado coeficiente de difusión de humedad. Para que los modelos puedan operar correctamente, obteniendo estimaciones precisas, es imprescindible disponer de un valor adecuado de este parámetro.

La determinación experimental del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos es una tarea difícil debido a la dependencia que presenta su valor respecto de la concentración de humedad. En la literatura técnica se pueden

encontrar distintos valores del coeficiente de difusión de humedad para aislamientos celulósicos. La mayor parte de estos trabajos fueron desarrollados hace más de 25 años y, tal como se ha comprobado experimentalmente, no representan de manera adecuada el comportamiento de la humedad en estos sistemas.

En la presente tesis doctoral se ha llevado a cabo un estudio experimental dirigido a obtener expresiones que permitan calcular con precisión el coeficiente de difusión de humedad en papeles aislantes de transformadores, tanto impregnados con aceite mineral como sin impregnar. En las ecuaciones obtenidas se incluye la dependencia del coeficiente con la concentración local de humedad, la temperatura del aislamiento y el espesor del aislamiento. Adicionalmente se ha estudiado la dependencia del coeficiente con el grado de envejecimiento del papel.

Abstract

Power transformers are key elements in power systems, while being one of the most expensive equipment in these systems. They are responsible for raising voltage levels at generation stations in order to reduce power losses in electricity transmission, and also for reducing the voltage to adequate levels at consumption points.

Power transformer reliability is essential for an adequate operation of power systems. Some of the main causes of transformer failures are related to their electrical insulation. In high and medium size transformers, electrical insulation is composed of oil impregnated cellulose (Kraft paper wound in layers around the conductors and pressboard pieces) and oil. Water is one of the most damaging agents for power transformer insulation.

Water is harmful to cellulose insulation because it accelerates the aging process, reduces the dielectric margin and decreases the partial discharges inception voltage. These phenomenon increases the probability of unexpected failures.

Understanding and properly estimating the moisture dynamics in power transformer insulation is essential for improving the manufacturing process, operation and maintenance of these equipments. Moisture dynamics inside the cellulose insulation can be estimated using a mathematical model of diffusion based on Fick's second law. The main parameter of this mathematical model is the so-called moisture diffusion coefficient. The simulation models accuracy estimations depends on the moisture diffusion coefficient value.

The experimental determination of the moisture diffusion coefficient in cellulose insulation is a difficult task, mainly because of its dependence with moisture concentration. In the technical literature different values of the diffusion coefficient of moisture into cellulose insulation can be found. Most of these works were performed more that 25 years ago and, as has been experimentally proved, they do not represent properly the moisture behavior in these systems.

In this thesis work, an experimental study has been performed oriented to obtain expressions that allow an accurate calculation of the moisture diffusion coefficient into the transformer solid insulation. Expressions have been obtained both for

impregnated and non-impregnated Kraft paper. In the proposed equations the dependence with local moisture concentration, insulation temperature and insulation thickness have been included. Further the dependence of the coefficient with aging degree has been studied.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Humedad en los aislamientos celulósicos y expectativa de vida del transformador.....	2
1.2	Planteamiento del problema	3
1.3	Objetivo de la tesis.....	4
1.4	Estructura del documento.....	5
2	Dinámica de la humedad en los aislamientos del transformador	7
2.1	Aislamiento del transformador de potencia.....	7
2.1.1	El sistema papel-aceite	7
2.1.2	Estructura del aislamiento sólido del transformador de potencia.....	8
2.1.3	Composición de los aislamientos celulósicos	10
2.2	Humedad en los aislamientos del transformador	11
2.2.1	Efectos de la humedad en el aislamiento celulósico del transformador ..	12
2.2.2	Fuentes de contaminación de humedad en los transformadores.....	13
2.3	Dinámica de la humedad en el transformador.....	14
2.3.1	Adsorción y desorción de humedad en los aislamientos celulósicos.....	15
2.3.2	Solubilidad del agua en el aceite	18
2.3.3	Equilibrio de humedad en el sistema papel-aceite.....	19
2.3.4	Distribución de la humedad en el transformador.....	24
2.4	Modelado de la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos del transformador.....	26
2.4.1	Modelo matemático para el análisis de la migración de humedad	26
2.4.2	Modelo de elementos finitos para el análisis de migración de humedad	29

2.5	Aplicaciones del modelado de la migración de humedad en los aislamientos celulósicos.	30
2.5.1	Análisis de procesos de secado del aislamiento de los transformadores.	30
2.5.2	Determinación del contenido de humedad en los aislamientos celulósicos de un transformador en servicio.....	33
2.5.3	Calibración de sensores para la estimación del contenido de humedad del aislamiento sólido.....	34
2.6	Efecto del valor del coeficientes de difusión en la estimación de la migración de humedad en los aislamientos celulósicos	35

3 Métodos experimentales para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos 39

3.1	Clasificación de los métodos para la estimación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos	39
3.2	Descripción de los tipos de experimentos	42
3.2.1	Experimentos gravimétricos	42
3.2.2	Experimentos basados en los perfiles de concentración de humedad....	48
3.3	Base del modelo matemático.....	53
3.4	Métodos de solución al modelo matemático.....	54
3.4.1	Solución directa	54
3.4.2	Aproximación analítica a la ecuación de difusión.....	54
3.4.3	Método de régimen regular (RR).....	57
3.4.4	Métodos numéricos.....	58
3.5	Métodos empleados por otros autores en la determinación del coeficiente de difusión en aislamientos celulósicos.....	63
3.5.1	Método empleado por Ast.....	63
3.5.2	Método empleado por Guidi y Fullerton	65
3.5.3	Método empleado por Howe y Asem.....	67
3.5.4	Método empleado por Foss	71
3.5.5	Metodología empleada por Du.....	71

3.5.6	Clasificación de las metodologías de los diferentes autores.....	74
-------	--	----

4 Determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles sin impregnar 77

4.1	Determinación de las curvas de secado mediante TGA	78
4.2	Modelo MEF para simular el secado del papel aislante de transformador.....	80
4.2.2	Geometría	81
4.2.3	Propiedades físicas.....	82
4.2.4	Entradas del modelo	82
4.2.5	Condiciones de frontera.....	83
4.2.6	Salida del modelo	83
4.3	Proceso de optimización por algoritmos genéticos.....	84
4.3.1	Algoritmos genéticos	85
4.3.2	Función objetivo	87
4.3.3	Función de optimización por algoritmos genéticos	88
4.4	Estudio experimental.....	91
4.4.1	Preparación de las muestras	91
4.4.2	Obtención de las curvas de secado	93
4.5	Estimación del coeficiente de difusión de humedad para papeles sin impregnar.....	97
4.5.1	Aplicación del proceso de optimización a las curvas experimentales	97
4.5.2	Análisis de resultados para el parámetro k	100
4.5.3	Análisis de resultados para el parámetro D_0	104
4.5.4	Coeficiente de difusión de humedad en papel Kraft no impregnado ...	108
4.6	Validación de los coeficientes de difusión propuestos.....	109
4.6.1	Validación del coeficiente de difusión con curvas de secado isotérmico	109
4.6.2	Validación del coeficiente de difusión con curvas de secado a temperatura variable.	111

4.7	Conclusiones	114
-----	--------------------	-----

5 Determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados..... 117

5.1	Planta de secado empleada en el estudio experimental	118
5.2	Preparación de los especímenes de prueba para los experimentos de secado	121
5.2.1	Envejecimiento de los especímenes de aislamiento.....	122
5.2.2	Humectación e impregnación de los especímenes de aislamiento	125
5.3	Experimentos de secado	126
5.3.2	Descripción de los experimentos de secado realizados	128
5.4	Estimación del coeficiente de difusión	132
5.4.1	Modelo de secado por elementos finitos	133
5.4.2	Proceso de optimización	138
5.5	Determinación del coeficiente de difusión a partir de las curvas de secado experimentales.....	139
5.5.2	Análisis estadístico	141
5.5.3	Coeficiente de difusión de humedad en papel impregnado de aceite. 150	
5.6	Validación de los coeficientes de difusión propuestos	155
5.6.2	Validación usando las curvas de secado empleadas en la determinación del coeficiente de difusión de humedad	156
5.6.3	Validación con curvas de secado no incluidas en la determinación del coeficiente de difusión de humedad.....	158
5.7	Conclusiones	163

6 Conclusiones..... 167

6.1	Conclusiones generales.....	167
6.1.1	Coeficientes de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite	167
6.1.2	Coeficientes de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft impregnados de aceite	169

6.2	Aportaciones originales.....	171
6.3	Sugerencias para trabajos futuros.....	172
6.4	Publicaciones y proyectos de investigación.....	173
Bibliografía.....		177
Apéndices		191
A Principales métodos para el secado de transformadores		193
A.1.	Método de secado por circulación de aceite	193
A.2.	Circulación de aire caliente	194
A.3.	Vacío con aplicación de calor.....	195
A.4.	Secado por vapor de keroseno (Vapour-phase).....	196
B Curvas de secado de aislamiento de papel sin impregnar		197
C Valores de k y D_0 para papeles sin impregnar		199
D Experimentos de secado en especímenes de prueba de papel impregnado		201
D.1.	Condiciones de los secados realizados.....	201
D.2.	Medición de temperatura de la cara externa del aislamiento	202
D.3.	Curvas de secado de los especímenes de prueba de papeles impregnados	204
E Análisis estadístico de los parámetros del coeficiente de difusión de papeles impregnados		207
E.1.	Descripción de los casos combinados.....	207
E.2.	Análisis descriptivo casos individuales.....	208
E.3.	Análisis descriptivo casos combinados	211
E.4.	Análisis multivariante.....	215
E.5.	Cálculo de D_2 , $D_1 = 0,5$ y $k = 0,5$	218

Índice de Figuras

Figura 2.1 Vista detallada de un corte transversal del devanado de un transformador de potencia de 400 kV. Tomada de [16] y modificada.	9
Figura 2.2 Estructura molecular de la celulosa, tomada de [17].	10
Figura 2.3 Incremento del contenido de agua en la celulosa como función de la escisión de sus cadenas moleculares, tomada de [17].	14
Figura 2.4 Aislamiento celulósico (a) estructura, (b) vista microscópica, tomada de [38].	15
Figura 2.5 Adsorción de las moléculas de agua en la celulosa. (a) monocapa, (b) multicapa.	16
Figura 2.6 Curva general de sorción isotérmica, tomada de [15].	17
Figura 2.7 Gráfica del límite de saturación del aceite en función de la temperatura.	19
Figura 2.8 Curvas de equilibrio papel-aceite (a) curvas propuestas por Oommen [88], (b) curvas propuestas por el MIT [25].	21
Figura 2.9 Concentración de equilibrio del aislamiento celulósico (C_e) a una temperatura de 90 °C.	22
Figura 2.10 Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite.	24
Figura 2.11 Ejemplo de distribución de temperatura y humedad de un modelo de devanado, tomado de [17].	24
Figura 2.12 Distribución del aislamiento sólido en un transformador.	25
Figura 2.13 Esquema del modelo por elementos finitos para el análisis de la difusión de humedad en el aislamiento sólido.	30
Figura 2.14 Estimación de la desorción de humedad para aislamiento de papel sin impregnar. (a) Perfiles de concentración, (b) Curvas de secado.	36
Figura 2.15 Estimación de la desorción de humedad para aislamiento de papel impregnado de aceite. (a) Perfiles de concentración, (b) concentración media.	37
Figura 3.1 Clasificación de los métodos experimentales para la estimación del coeficiente de difusión en sólidos.	41

Figura 3.2 Esquema de los experimentos de permeación.....	42
Figura 3.3 Gráfica empleada para la determinación del coeficiente de difusión por el método de tiempo de retardo, adaptado de [20]......	44
Figura 3.4 Túnel de secado empleado en la estimación del coeficiente de difusión de humedad, tomado de [127].	46
Figura 3.5 Esquema de un experimento para la determinación del perfil de concentración de humedad. Adaptado de [127]	49
Figura 3.6 Equipo para valoración coulométrica de Karl Fischer, 1- recipiente de valoración, 2- horno para la extracción de humedad de sólidos.	52
Figura 3.7 Ejemplo de evaluación del método simplificado, para difusividad variable, tomado de [127]......	56
Figura 3.8 Gráfica para explicar la aproximación de las derivadas de una función por el método de diferencias finitas.	59
Figura 3.9 Concentración y perfiles de concentración de humedad durante un proceso de adsorción. Las líneas continuas son los perfiles de concentración dibujados a partir de las ecuaciones polinómicas. Tomada de [40].	67
Figura 3.10 Fotografías de las muestras usadas por Howe. (a) cartón prensado, (b) papel.	68
Figura 3.11 Gráfica del coeficiente de difusión, para papel sin impregnar, obtenida por Asem mediante experimentos de humectación.....	70
Figura 3.12 Esquema del experimento realizado por Du para determinación de los perfiles de concentración de humedad en cartón prensado.	72
Figura 3.13 . Perfiles de concentración de humedad calculados a partir de mediciones dielectrométricas sobre una muestra de cartón sin impregnar de aceite sometida a un proceso de adsorción de humedad. Tomada de [26].	73
Figura 4.1 Corte del horno del TGA.....	79
Figura 4.2 Pérdida de masa de una muestra de papel durante un secado a temperatura constante de 40 °C.....	80
Figura 4.3 Curva de secado calculada a partir de los datos de pérdida de masa de la Figura 4.2.....	80
Figura 4.4 Geometría empleada en el modelo de secado MEF.	81
Figura 4.5 Evolución de la concentración local de humedad, obtenida mediante el modelo de secado por elementos finitos.	84

Figura 4.6 Diagrama esquemático de la función objetivo.	88
Figura 4.7 Diagrama de flujo de la función de optimización por algoritmos genéticos.	89
Figura 4.8 Curvas de equilibrio de humedad en papeles expuestos al aire (curvas de Jeffries) tomadas de [26] y modificada. En abscisas aparece la humedad relativa del aire, en las ordenadas la humedad del papel.	92
Figura 4.9 Absorción de agua en cartones prensados de alta densidad a 23 °C y 50% de humedad relativa del aire. Los puntos corresponden a los valores medidos y las líneas a sus respectivas curvas de ajuste. Tomado de [38].	93
Figura 4.10 Recipientes de PTFE empleados en el secado de las muestras de papel en el TGA.	94
Figura 4.11 Primeros instantes del secado en el TGA de una muestra de 3mm de espesor con consigna de temperatura de 80 °C.	94
Figura 4.12 Incremento de temperatura en el TGA, para una rampa de crecimiento tipo escalón y temperatura de consigna de 90 °C.	95
Figura 4.13 Curvas de secado a diferentes temperaturas, para muestras de papel de 3 mm de espesor.	96
Figura 4.14 Curvas de secado a 70 °C, para muestras de papel de diferente espesor.	96
Figura 4.15 Curvas de secado experimental y estimada para una muestra de papel de 4 mm de espesor secada a una temperatura de 70 °C.	98
Figura 4.16 Valores de D_0 y k resultantes del proceso de optimización.	99
Figura 4.17 Número de veces que se aplicó el proceso de optimización en función de: (a) la temperatura de secado y (b) el espesor de la muestra.	100
Figura 4.18 Valores del parámetro k en función de la temperatura del aislamiento.	101
Figura 4.19 Valores del parámetro k en función del espesor del aislamiento.	101
Figura 4.20 Parámetro k (a) gráfico de dispersión, (b) histograma.	102
Figura 4.21 Gráfica de probabilidad normal de k	102
Figura 4.22 Valores de D_0 en función de la temperatura del aislamiento.	104
Figura 4.23 Valores de D_0 en función del espesor del aislamiento.	104

Figura 4.24 Valores promedio de D_0 en función de la temperatura, para los distintos espesores.	105
Figura 4.25 Valores linealizados de D_0 en función del espesor y sus respectivas curvas de ajuste.	106
Figura 4.26 Valores de D_1 en función del espesor y su curva de ajuste.	108
Figura 4.27 Valores de D_2 en función del espesor y su curva de ajuste.	108
Figura 4.28 Curvas de secado estimadas con diferentes expresiones del coeficiente de difusión de humedad. Temperatura 60 °C, espesor de la muestra de papel de 2 mm.	110
Figura 4.29 Perfil de temperatura usado en el secado de una muestra de papel de 2 mm de espesor.	112
Figura 4.30 Concentración media de humedad de una muestra de papel de 2 mm de espesor, secada con el perfil de temperatura de la Figura 4.29.	112
Figura 4.31 Perfil de temperatura usado en el secado de una muestra de papel de 3 mm de espesor.	113
Figura 4.32 Concentración media de humedad de una muestra de papel de 3 mm de espesor, secada con el perfil de temperatura de la Figura 4.31.	113
Figura 5.1 Planta de secado por circulación de aceite. (a) esquema general, (b) fotografía. 1-depósito de muestras, 2-filtro de aceite, 3-bomba de recirculación, 4-vaso de expansión, 5-calefactor.	119
Figura 5.2 Interfaz del sistema de control de la planta de secado.	120
Figura 5.3 Registro de señales en la planta de secado.	121
Figura 5.4 (a) Dibujo del núcleo de aluminio, (b) Espécimen de aislamiento de 1 mm de espesor. 1-núcleo de aluminio, 2- aislamiento de papel, 3- resistencia para emular el calentamiento desde los conductores, 4-sonda de temperatura para medir la temperatura interna del aislamiento.	122
Figura 5.5 Vida útil del aislamiento celulósico, en función de la temperatura.	123
Figura 5.6 Curvas de Jeffries, condiciones de humectación escogidas.	125
Figura 5.7 Extracción de muestras de aislamiento, para la determinación del contenido de humedad durante el secado.	127
Figura 5.8 Curva de secado obtenida de para uno de los especímenes de prueba.	128

Figura 5.9 Zona de baja humedad para la extracción de las muestras de aislamiento. (a) vista exterior, (b) vista interior.....	129
Figura 5.10 Registro de humedad relativa de la zona para extracción de muestras.	129
Figura 5.11 Curva de secado de diferentes caras de un espécimen de prueba de 3 mm.	130
Figura 5.12 Especímenes de aislamiento en el depósito de muestras.	131
Figura 5.13 Curva de secado experimental y estimada usando el coeficiente de difusión propuesto por Foss, para un aislamiento de 5 mm de espesor y temperatura de secado de 80 °C.	131
Figura 5.14 Distribución de temperatura en el aislamiento, cuando se emula el calor generado desde los conductores del transformador.....	134
Figura 5.15 Medición de la temperatura de la cara externa del aislamiento.....	135
Figura 5.16 Función objetivo empleada en el proceso de optimización.....	139
Figura 5.17 Resultados de los procesos de optimización.....	140
Figura 5.18 Histograma y gráfico de densidad suavizada de los parámetros k , D_1 y D_2 para el caso combinado No 1.	145
Figura 5.19 Ejemplo del procedimiento “pelar la cebolla”, para determinar la media multivariante de dos variables.	146
Figura 5.20 Ejemplo de superficie de un volumen construido mediante triángulos.	147
Figura 5.21 Volúmenes resultantes al aplicar la triangulación de Delaunay y envolvente convexa a los datos de la Figura 5.17, (a) 1 vez, (b) 70 veces, (c) 114 veces.....	147
Figura 5.22 Valores de D_2 en función del espesor.	152
Figura 5.23 Variación del coeficiente de difusión.	154
Figura 5.24 Coeficiente de difusión de humedad en función del espesor del aislamiento, calculado para una temperatura de 85 °C y una concentración de humedad de 5%.	155
Figura 5.25 Curvas de secado experimental y simuladas del espécimen 14150.	158
Figura 5.26 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel nuevo de 5 mm de espesor (especimen 15450).....	160
Figura 5.27 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel envejecido de 3 mm de espesor (especimen 15830).	160

Figura 5.28 Curvas de secado experimental, aislamiento de papel envejecido de 4 mm de espesor (espécimen 16340).	161
Figura 5.29 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel con envejecimiento intermedio de 5 mm de espesor (espécimen 16050). ..	162
Figura 5.30 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel con envejecimiento intermedio de 1 mm de espesor (espécimen 16210). ..	163
Figura A.1. Método de secado mediante circulación de aceite.	193
Figura A.2. Esquema del método de secado por circulación de aire caliente.....	194
Figura A.3. Esquema de una instalación de secado por vapour-phase, tomado de [82].....	196
Figura B.1. Curvas de secado, aislamiento de 2 mm.	197
Figura B.2. Curvas de secado, aislamiento de 3 mm.	197
Figura B.3. Curvas de secado, aislamiento de 4 mm.	198
Figura B.4. Curvas de secado, aislamiento de 5 mm.	198
Figura C.1. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 2 mm de espesor.	199
Figura C.2. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 3 mm de espesor.	199
Figura C.3. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 4 mm de espesor.	200
Figura C.4. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 5 mm de espesor.	200
Figura D.1. Aislamiento de 1 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in}	202
Figura D.2. Aislamiento de 3 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in}	203
Figura D.3. Aislamiento de 5 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in}	203
Figura D.4. Curvas de secado, secados 1 y 2.	204
Figura D.5. Curvas de secado, secados 3 y 4.	204
Figura D.6. Curvas de secado, secados 5 y 6.	204

Figura D.7. Curvas de secado, secados 7 y 8.....	205
Figura D.8. Curvas de secado, secados 9 y 10.....	205
Figura D.9. Curvas de secado, secados 11 y 12.....	205
Figura D.10. Curvas de secado, secados 13 y 14.....	206
Figura E.1. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 2 y 3.....	212
Figura E.2. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 11 y 12.	212
Figura E.3. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 17 y 18.	213
Figura E.4. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. (a) caso26., (b) caso 27.....	213
Figura E.5. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 2 y 3.	216
Figura E.6. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 11 y 12.	217
Figura E.7. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 17 y 18.	217
Figura E.8. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 26 y 27.	217

Índice de tablas

Tabla 2.1 Tipos de cartón y papel comprimido, comúnmente usados en transformadores.	11
Tabla 2.2 Variabilidad de la constante de tiempo de adsorción de humedad	17
Tabla 2.3 Coeficientes de la ecuación 2.3 y 2.4, tomados de [25, 81].	18
Tabla 2.4 Estado del aislamiento sólido del transformador en función de su contenido de humedad, tomada de [51].	31
Tabla 3.1 Datos experimentales y valores estimados del coeficiente de difusión obtenidos por Ast, tomado de [26].	65
Tabla 3.2 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Howe.....	69
Tabla 3.3 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Asem, obtenidos a partir del experimento de humectación.....	70
Tabla 3.4 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Asem, obtenidos a partir del experimento de humectación.....	70
Tabla 3.5 Parámetros del coeficiente de difusión de humedad en papeles aislantes encontrados por Foss.....	71
Tabla 3.6 Clasificación de las metodologías seguidas por otros autores, para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador.	75
Tabla 4.1 Ajustes de temperatura usados en los experimentos de secado en el TGA.	95
Tabla 4.2 Ajuste de los parámetros de la función GA	97
Tabla 4.3 Resumen estadístico de k	103
Tabla 4.4 Coeficientes de ajuste de D_0 para los diferentes espesores de papel.....	107
Tabla 4.5 Distancia Euclidiana para las curvas de secado al emplear diferentes expresiones del coeficiente de difusión de humedad.....	111
Tabla 4.6 Distancia Euclidiana para los casos de validación con temperatura variable	113

Tabla 5.1 Especificaciones de la planta de secado por circulación de aceite.	120
Tabla 5.2 Condición del aislamiento de acuerdo al grado de polimerización medio. Tomado de [112].	124
Tabla 5.3 Parámetros para el cálculo de la temperatura de la cara externa del aislamiento de acuerdo a la temperatura del aceite.....	135
Tabla 5.4 Condiciones de los secados bajo circulación de aceite realizados.....	142
Tabla 5.5 Descripción de los casos de poblaciones combinadas analizados	143
Tabla 5.6 . Descripción de los ocho casos combinados más relevantes	143
Tabla 5.7 Valores de la mediana multivariante de k , D_1 y D_2 para los casos individuales.	148
Tabla 5.8 Valores de la mediana multivariante de k , D_1 y D_2 para los casos combinados.	149
Tabla 5.9 Valor de mediana de D_2 casos combinados cuando $k=0,5$ y $D_1=0,5$	151
Tabla 5.11 Validación del coeficiente de difusión en especímenes de aislamiento de papel nuevo.....	156
Tabla 5.12 Validación del coeficiente de difusión en especímenes de aislamiento de papel envejecido.	157
Tabla 5.13 Especímenes empleados en la validación de los coeficientes de difusión.	159
Tabla 5.14 Validación del coeficiente de difusión, secado Nº 15, especímenes de aislamiento de papel nuevo.	159
Tabla 5.15 Validación del coeficiente de difusión, secado Nº 15, especímenes de aislamiento de papel envejecido.	159
Tabla 5.16 Validación del coeficiente de difusión, secado Nº 16, especímenes de papel envejecido.	161
Tabla 5.17 Validación del coeficiente de difusión empleando las ecuaciones para papeles nuevos en especímenes de aislamiento con envejecimiento intermedio (Secado Nº 16).	162
Tabla 5.18 Validación del coeficiente de difusión empleando las ecuaciones para papeles envejecidos en especímenes de aislamiento con envejecimiento intermedio (Secado Nº 16).....	162
Tabla D.1. Condiciones de los secados bajo circulación de aceite realizados.	201

Tabla D.2. Temperaturas medidas en la cara externa del aislamiento para las diferentes condiciones de secado evaluadas.	202
Tabla E.1. Descripción de los casos de poblaciones combinadas analizados.	207
Tabla E.2. Análisis descriptivo parámetro k , para los distintos especímenes de prueba.	208
Tabla E.3. Análisis descriptivo parámetro D_1 , para los distintos especímenes de prueba.	209
Tabla E.4. Análisis descriptivo parámetro D_2 , para los distintos especímenes de prueba.	210
Tabla E.5. Resumen estadístico casos combinados 2 y 3.	211
Tabla E.6. Resumen estadístico casos combinados 11 y 12.	211
Tabla E.7. Resumen estadístico casos combinados 17 y 18.	211
Tabla E.8. Resumen estadístico casos combinados 26 y 27.	212
Tabla E.9. Valores de la mediana de todos los casos combinados.	214
Tabla E.10. Mediana multivariante, casos individuales.	215
Tabla E.11. Valores de la mediana multivariante de todos los casos combinados.	216
Tabla E.12. Medidas de posición y dispersión de D_2 para cada espécimen de prueba, cuando k y D_1 se fijan en 0,5.	218
Tabla E.13. Valor de la mediana de D_2 para los casos combinados, cuando se fijan k y D_1 en 0,5.	219
Tabla E.14. Valor de la mediana de D_2 para los casos combinados, cuando se fijan k y D_1 en 0,5.	220

Lista de símbolos y variables

Símbolo	Significado
A, B	Coeficientes de ajuste saturación aceite
A', B'	Coeficientes de ajuste saturación aceite
A_r	Contenido total de aromáticos del aceite
A_n	Número de acidez del aceite
B_0	Campo magnético externo
c	Concentración local de humedad
c_{est}	Concentración local de humedad estimada mediante simulación
c_w	Concentración de humedad en forma líquida
c_v	Concentración de humedad en forma de vapor
c_0	Concentración inicial de humedad
C_e	Concentración de equilibrio en el aislamiento celulósico
C_m	Concentración media de humedad
C_{m-est}	Concentración media de humedad estimada mediante simulación
C_{m-exp}	Concentración media experimental, medida mediante Karl Fischer
C_{m-TGA}	Concentración media de humedad obtenida de los experimentos en el TGA
D	Coeficiente de difusión o difusividad
D_{FOSS}	Coeficiente de difusión de humedad de Foss
D_G	Factor pre-exponencial del coeficiente de difusión de Guidi
D_{Guidi}	Coeficiente de difusión de humedad de Guidi
D_v	Coeficiente de difusión de humedad en fase de vapor
D_w	Coeficiente de difusión de humedad en fase líquida
D_0	Factor pre-exponencial del coeficiente de difusión de humedad
D_1	Factor pre-exponencial de D_0
D_2	Factor exponencial de D_0
\overline{DP}_v	Grado de polimerización medio
E_a	Energía de activación
$Euclidean$	Distancia euclidiana
f	Frecuencia del campo
F	Flujo de sustancia
F_{AA}	Factor de aceleración del envejecimiento
FL	Valor objetivo (Fitness limit)
F_0	Número de Fourier
I	Cantidad de humedad que pasa de la fase líquida a la fase de vapor
k	Parámetro adimensional que relaciona la dependencia del coeficiente de difusión de humedad con la concentración de humedad
K	Coeficiente de transferencia de masa
k_B	Probabilidad de que una molécula adsorbida pueda abandonar el sitio activo que la retiene

Símbolo	Significado
l	Espesor del aislamiento
L	Longitud característica
M_t	Masa de la muestra en el tiempo t
M_∞	Masa de la muestra en el equilibrio
P	Presión parcial de vapor de agua
P_c	Presión crítica del agua
P_{sat}	Presión de saturación de vapor de agua
Q	Cantidad de agua por unidad de área
RH	Humedad relativa
RS	Saturación relativa
S_h	Número de Sherwood
t	Tiempo
t_{exp}	Tiempo de exposición
T	Temperatura en grados Celsius
T_0	Temperatura de referencia
T_{in}	Temperatura de la cara interna del aislamiento
T_{ex}	Temperatura de la cara externa del aislamiento
T_{oil}	Temperatura del aceite
T_c	Temperatura crítica del agua
T_k	Temperatura en Kelvin
W	Contenido de agua
W_k	Contenido de agua correspondiente a una monocapa completa
W_c	Contenido de agua en el aislamiento celulósico
W_{oil}	Contenido de agua en el aceite
W_{s-c}	Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico
W_{s-oil}	Límite de saturación del aceite
$W_{TGA}(t)$	Peso de la muestra de aislamiento en el tiempo t , obtenida mediante el TGA
W_{DS}	Peso de la muestra seca de aislamiento de papel sin impregnar
x	Distancia
X	Vector de variables independientes
X_f	Vector final de variables independientes
X^0	Relación adimensional de humedad
X_0	Vector inicial de variables independientes
Y	Número de capas de moléculas de agua adsorbidas
ρ_s	Concentración de masa
γ	Relación giro-magnética

Capítulo 1

Introducción

El transformador de potencia es un equipo imprescindible en la operación de los sistemas de generación y transmisión de energía eléctrica. En el actual escenario mundial de desregulación del sector eléctrico, los fallos en los transformadores de potencia tienen una alta importancia, puesto que acarrearán importantes costes asociados, no solo con la reparación o sustitución de los equipos y con la demanda que deja de atenderse, sino también con las penalizaciones por interrupción del servicio y la pérdida de imagen de las empresas eléctricas ante sus usuarios. De ahí la importancia de evitar condiciones de operación que pongan en peligro la expectativa de vida de los transformadores de potencia.

La humedad alojada en los aislamientos celulósicos afecta de manera negativa la expectativa de vida del transformador de potencia, y puede dar lugar a condiciones de riesgo dentro del transformador. Por ello los transformadores de potencia se someten a un proceso de secado una vez finalizada su construcción y antes de la impregnación de los aislamientos con aceite. No obstante, durante la operación del transformador es posible el ingreso de humedad desde la atmósfera y adicionalmente los procesos de envejecimiento de los aislamientos de un transformador generan agua, con lo que la humedad en el aislamiento sólido de un transformador se incrementa a lo largo de su vida. Para extraer la humedad en los transformadores de potencia se llevan a cabo secados periódicos en campo.

Para optimizar los procesos de secado (tanto los que se llevan a cabo en fábrica como los que se llevan a cabo en campo) es importante disponer de modelos matemáticos precisos que permitan cuantificar la evolución de la humedad en el aislamiento sólido del transformador durante el proceso de secado. Evidentemente, la capacidad de predicción de un modelo está estrechamente relacionada con la

utilización de unos adecuados valores de los parámetros empleados en los modelos, cosa que, como se verá más adelante, no siempre ocurre.

El disponer de un modelo de humedad adecuado (y unos parámetros adecuados con los que alimentar el modelo) es también de utilidad para el desarrollo de sensores que permitan cuantificar el contenido de humedad en el aislamiento sólido y detectar las condiciones de operación que puedan resultar peligrosas para el equipo.

Con el trabajo realizado en esta tesis se pretende mejorar la precisión de los modelos de difusión de humedad, que permiten estudiar la dinámica de la humedad en los aislamientos de los transformadores de potencia.

En el presente capítulo se presenta el marco general de la tesis doctoral incluyendo el planteamiento del problema que se pretende abordar, los objetivos que se plantean y la estructura de la memoria de la tesis.

1.1 Humedad en los aislamientos celulósicos y expectativa de vida del transformador

La expectativa de vida de un transformador de potencia está muy relacionada con la integridad de su aislamiento eléctrico, y en especial con la de su aislamiento sólido.

Los aislamientos celulósicos se ven afectados de manera negativa por diversos agentes entre los que se encuentran el agua. El agua es dañina para los aislamientos celulósicos, puesto que acelera su envejecimiento, reduce su capacidad dieléctrica y disminuye la tensión de iniciación de las descargas parciales. Debido al carácter hidrófobo del aceite dieléctrico e hidrófilo de los aislamientos celulósicos la humedad en el transformador se aloja mayoritariamente en estos últimos. Todas las acciones encaminadas a monitorizar, controlar y reducir el contenido de agua en los aislamientos celulósicos buscan preservar la expectativa de vida del transformador de potencia así como aumentar la fiabilidad de su operación en el sistema eléctrico.

Para realizar estas acciones de manera eficaz es necesario estimar de forma precisa la dinámica de la humedad en los aislamientos del transformador. Los modelos matemáticos de difusión de humedad implementados en herramientas de simulación son una alternativa muy útil para lograr esa estimación. Sin embargo, la precisión de estos modelos depende en gran medida del valor del parámetro denominado coeficiente de difusión de humedad.

Como se mostrará en el capítulo 2, la estimación de la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos cambia significativamente en función del valor del coeficiente de difusión empleado en los modelos de simulación. Esta comparación se ha realizado usando diferentes valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos sólidos, obtenidos por distintos investigadores principalmente en las décadas de 1970 y 1980.

1.2 Planteamiento del problema

Cuando se planteó inicialmente la investigación doctoral, los trabajos se enfocaron a analizar los procesos de secado que actualmente se aplican a transformadores de potencia, buscando alternativas para mejorar su eficiencia, es decir, reducir el tiempo requerido para la extracción de humedad de los aislamientos. Esto se realizaría mediante un análisis teórico basado en estimaciones de la migración de humedad en los aislamientos del transformador, a través de modelos de secado del aislamiento implementados en un programa de simulación por elementos finitos. Este trabajo se complementaría mediante la verificación experimental de los resultados en dos plantas de secado a escala.

Dado que la precisión de los modelos de secado mediante las ecuaciones de difusión, depende del valor del coeficiente de difusión de humedad empleado, en una primera etapa del trabajo se realizó la verificación experimental de uno de los coeficientes de difusión de humedad reportados en la literatura, encontrando una deficiente estimación de la desorción de humedad. Este hecho llevó a replantear el objetivo de la tesis doctoral hacia la determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles de transformador, proponiendo también una metodología experimental que pudiera aplicarse sobre otros tipos de aislamientos celulósicos de transformador como cartones y papeles térmicamente mejorados.

Este cambio de enfoque del trabajo de investigación doctoral coincidió con la aparición de varios trabajos sobre esta misma temática [2, 54, 58, 62, 69, 95, 110], lo que prueba que la actualidad existe un renovado interés sobre el análisis de la dinámica de la humedad en los aislamientos del transformador.

Como se ha señalado, la mayor parte de los trabajos que reportan valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos celulósicos fueron realizados

hace más de 25 años. Durante estos años se ha logrado una mejora en los materiales aislantes, por lo que de cara a abordar estudios sobre migración de la humedad en un transformador mediante modelos de difusión, es necesario cuestionar si los valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos celulósicos reportados en la literatura siguen o no teniendo validez.

Adicionalmente, estudios recientes han mostrado que los aislamientos celulósicos envejecidos, tienen un comportamiento diferente ante la humedad, que los aislamientos nuevos [63, 95]. Este aspecto no fue tenido en cuenta en los estudios clásicos sobre la determinación de coeficientes de difusión de humedad y es relevante, ya que los aislamientos de la mayor parte de los transformadores que se encuentran en servicio presentarán un cierto grado de envejecimiento.

En la presente tesis se ha abordado la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador. El material estudiado fue el papel Kraft y se consideró la influencia de distintos factores como la impregnación con aceite, la temperatura y el envejecimiento de los aislamientos en dicho coeficiente.

1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo general de esta tesis doctoral es la determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador de tipo Kraft.

Los objetivos específicos son:

- Proponer y validar una metodología para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador.
- Determinar el coeficiente de difusión de la humedad en aislamientos de papel Kraft sin impregnar de aceite.
- Determinar el coeficiente de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft impregnados de aceite.
- Evaluar la influencia del envejecimiento en el valor del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft impregnados de aceite.

1.4 Estructura del documento

La presente memoria de tesis doctoral está constituida por seis capítulos.

En el primer capítulo se hace una descripción general de la tesis, presentando el planteamiento del problema que se pretende abordar y los objetivos de la tesis.

En el segundo capítulo se aborda el problema de la dinámica de humedad en los aislamientos del transformador, y se incluye la recopilación de los coeficientes de difusión de humedad reportados en la literatura técnica.

El capítulo tercero es una revisión del estado del arte de los principales métodos experimentales empleados para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en diferentes materiales sólidos. En este capítulo también se incluye la revisión crítica de las metodologías seguidas por otros autores en la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador.

El cuarto capítulo contiene una descripción de la metodología experimental desarrollada así como los resultados obtenidos en la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite.

En el capítulo quinto se presenta la metodología experimental implementada y los resultados obtenidos en la determinación del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos de papel Kraft impregnados de aceite.

Por último, en el capítulo sexto, se presentan las conclusiones del trabajo y las aportaciones originales que se han obtenido a lo largo de su desarrollo. También se apuntan las líneas de investigación que se pueden abordar en un futuro. Finalmente se enumeran las publicaciones derivadas hasta el momento del trabajo de investigación y la financiación con que se ha contado para realizarlo.

Capítulo 2

Dinámica de la humedad en los aislamientos del transformador

En este capítulo se hace una descripción general del aislamiento de un transformador de potencia, se analizan los efectos de la humedad en estos aislamientos, las fuentes de contaminación de humedad en los transformadores y el reparto de la humedad entre los diferentes tipos de aislamientos celulósicos. También se describe la dinámica de la humedad en el sistema papel-aceite que constituye el aislamiento del transformador. Posteriormente se presenta un modelo matemático de difusión mediante el cual es posible analizar la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos así como un modelo general de elementos finitos con el cual solucionar dicho modelo matemático de difusión.

En la última parte del capítulo se hace una recopilación de los valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos celulósicos reportados en la literatura técnica, y empleando un modelo de secado por elementos finitos, se muestra el efecto de usar los diferentes valores del coeficiente de difusión en la estimación de la migración de humedad en el interior de los aislamientos sólidos del transformador de potencia.

2.1 Aislamiento del transformador de potencia

2.1.1 El sistema papel-aceite

El aislamiento de un transformador tiene como misión principal aislar eléctricamente los elementos del transformador sometidos a distinto potencial eléctrico. En un transformador de potencia el aislamiento consta de dos partes principales, el aislamiento líquido y el aislamiento sólido. El aislamiento líquido es

sobre el que recae el mayor esfuerzo dieléctrico (soporta mayor campo eléctrico) debido a su menor constante dieléctrica [23, 71]. Además de su función dieléctrica, el aceite actúa como elemento refrigerante conduciendo el calor desde la parte activa del transformador, núcleo y arrollamientos, hacia el exterior. Por otra parte el aislamiento sólido tiene diferentes misiones: recubrir las partes metálicas en tensión, dividir los espacios de aceite en volúmenes más pequeños aptos para soportar mayores gradientes de campo y soportar mecánicamente los conductores y arrollamientos con el resto de la estructura [23].

Existen diversos tipos de aislamientos sólidos y líquidos empleados en la construcción de los transformadores de potencia. Entre los sólidos encontramos aislamientos a base de celulosa tratados por el método Kraft, papeles térmicamente mejorados y aislamientos sintéticos. En transformadores de pequeñas potencias y tensiones se emplean barnices y resinas como aislamiento sólido. Asimismo, en el campo de los aislamientos líquidos se encuentran los aceites minerales, los ésteres sintéticos y de origen vegetal así como otros tipos de líquidos aislantes como siliconas.

A pesar de que en los últimos años se han desarrollado nuevos materiales con características dieléctricas y térmicas superiores, el coste y el buen comportamiento de la combinación de aislamientos celulósicos con el aceite ha hecho que éste sea el sistema aislante más habitualmente empleado en todo tipo de transformadores eléctricos y en especial en transformadores de potencia. A este aislamiento compuesto suele llamársele sistema papel-aceite y su uso en transformadores eléctricos cubre rangos de potencia desde los 10 kVA hasta los 1 500 MVA y tensiones de línea de hasta 1 000 kV [94].

2.1.2 Estructura del aislamiento sólido del transformador de potencia

En la Figura 2.1, se muestra la fotografía del aislamiento de un transformador de potencia. Como se puede apreciar, en el interior del transformador existen distintos aislamientos celulósicos (papeles y cartones prensados), que en general poseen diferentes espesores y densidades acordes con las sollicitaciones dieléctricas y mecánicas a las que son sometidos durante la operación del transformador. Estos aislamientos se suelen clasificar en aislamientos delgados y calientes, aislamientos delgados y fríos, y aislamientos gruesos [17].

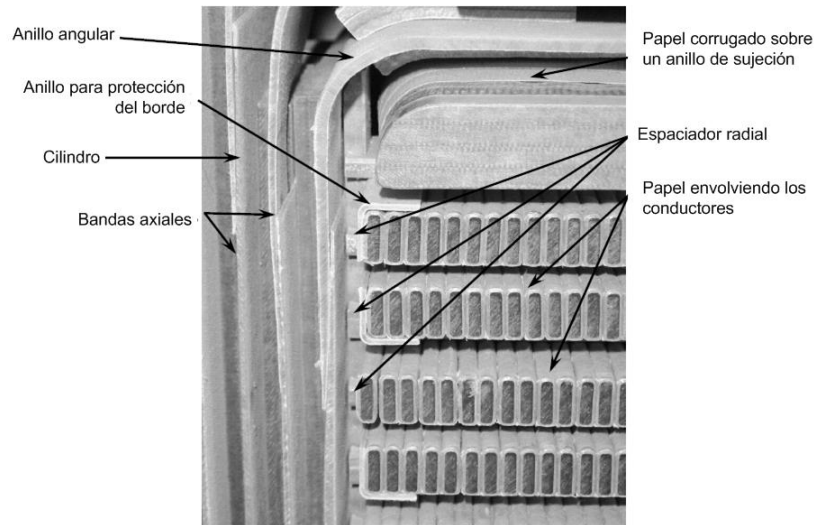


Figura 2.1 Vista detallada de un corte transversal del devanado de un transformador de potencia de 400 kV. Tomada de [16] y modificada.

Aislamientos delgados y calientes

Son los aislamientos que están en contacto directo con los conductores y suelen estar constituidos por papel Kraft, por lo que son los aislamientos menos densos. En total suponen alrededor de un 20% de la masa total del aislamiento sólido. Su temperatura se mantiene próxima a la del conductor, y se estima que un 5% de ellos está a una temperatura próxima a la del punto caliente.

Aislamientos delgados y fríos

Dentro de esta categoría se clasifican todos los cartones prensados, y en general todos los elementos dieléctricos de los arrollamientos que no están en contacto directo con los conductores (por ejemplo las barreras y los sombreretes). La temperatura de estos aislamientos es similar a la del aceite. Los aislamientos delgados y fríos tienen una densidad entre media y baja. Suponen entre el 20% y el 30% de la masa total del aislamiento sólido.

Aislamientos gruesos

Son las piezas celulósicas utilizadas para sujeción mecánica y apriete. Representan alrededor del 50% de la masa total de aislamiento sólido. Están constituidos por materiales celulósicos de elevada densidad y suelen presentar temperaturas más reducidas que otras zonas del transformador.

2.1.3 Composición de los aislamientos celulósicos

Tanto el papel como el cartón prensado usados en los aislamientos sólidos de los transformadores se fabrican a partir de pulpa de madera suave cruda, por el método Kraft. La pulpa, según Gasser [38], está compuesta principalmente de:

- Celulosa 75% - 85%
- Hemicelulosa 10% - 20%
- Lignina 2% - 6%
- Compuestos inorgánicos <0,5%

La celulosa es un polímero higroscópico lineal constituido por anhidroglucosa unida por lazos glucosídicos (Figura 2.2). Cuando la celulosa está completamente extendida, toma la forma de una cinta plana con grupos hidroxílicos (OH), altamente hidrófilos, sobresaliendo lateralmente y capaces de formar lazos tanto inter como intra moleculares (sitios activos). La superficie de la cinta, por su parte, consiste principalmente en átomos de hidrogeno ligados directamente con átomos de carbono que son además hidrófobos. Estas dos características de la celulosa son responsables de su estructura molecular y por tanto determinan sus principales propiedades físicas y químicas.

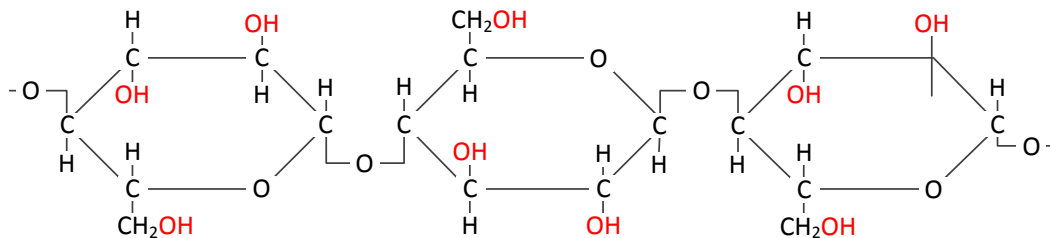


Figura 2.2 Estructura molecular de la celulosa, tomada de [17].

La hemicelulosa, el segundo componente de mayor presencia en los aislamientos celulósicos, es un complejo grupo de polisacáridos no uniforme que tiene un comportamiento higroscópico similar al de la celulosa. Finalmente la lignina, que es el tercer mayor componente de la pulpa de madera con la que se fabrica el papel, es hidrófoba.

En las normas UNE-EN 60641 Parte 1 y Parte 3 [113, 114], se dan las definiciones y especificaciones de los papeles y cartones comprimidos usados en equipos eléctricos. Se distinguen siete tipos de cartones y siete tipos de papeles. Los mostrados en la Tabla 2.1 son los comúnmente empleados en transformadores eléctricos. Todos los tipos de cartones y papeles indicados son fabricados con fibras

vegetales y en especial de pulpa de madera sulfatada con la cual se obtiene la pureza química requerida.

Tabla 2.1 Tipos de cartón y papel comprimido, comúnmente usados en transformadores.

Cartón		Papel	
Tipo	Subdivisiones	Tipo	Subdivisiones
B2	Cartón comprimido calandrado, de pureza química elevada. B2.1: 100% pulpa de madera sulfatada. B2.2: 100% algodón. B2.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. B2.4: Mezcla de algodón y yute.	P2	Papel comprimido de alta densidad y pureza química elevada. P2.1: 100% pulpa de madera sulfatada. P2.2: 100% algodón. P2.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. P2.4: Mezcla de algodón y yute.
B3	Cartón precomprimido muy duro y rígido, de pureza química elevada y altas características mecánicas. Superficie con aspecto textil. B3.1: 100% pulpa de madera sulfatada. B3.2: 100% algodón. B3.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. B3.4: Mezcla de algodón y yute.	P4	Papel comprimido suave, poroso, de pureza química especialmente elevada, y de alta absorción de aceite. P4.1: 100% pulpa de madera sulfatada. P4.2: 100% algodón. P4.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. P4.4: Mezcla de algodón y yute.
B4	Cartón comprimido suave calandrado, de pureza química elevada, y de alta absorción de aceite; se le puede dar forma B4.1 100% pulpa de madera sulfatada. B4.2 100% algodón. B4.3 Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. B4.4 Mezcla de algodón y yute.	P5	Papel comprimido poroso o moldeable de pureza química especialmente elevada y de alta absorción de aceite. P5.1: 100% pulpa de madera sulfatada. P5.2: 100% algodón. P5.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón. P5.4: Mezcla de algodón y yute.
B5	Cartón comprimido moldeable, de pureza química elevada y de alta absorción de aceite; se le puede dar forma. B5.1: 100% pulpa de madera sulfatada. B5.2: 100% algodón. B5.3: Mezcla de pulpa de madera sulfatada y algodón.		

2.2 Humedad en los aislamientos del transformador

La expectativa de vida del transformador de potencia viene determinada en gran medida por la integridad de su aislamiento celulósico, ya que cuando la celulosa envejece se reduce su resistencia a la tracción y por tanto la capacidad del transformador para soportar los esfuerzos dinámicos de cortocircuito. A su vez la vida del aislamiento celulósico depende principalmente de la temperatura a la que éste se vea sometido durante la operación del transformador, y de su contenido en agua, ya que el agua es un catalizador de las reacciones químicas de envejecimiento [16, 45, 52, 59, 74]. El agua en el interior de un transformador puede aparecer como consecuencia de contaminación externa o como un subproducto de la propia

degradación de los aislamientos. Por el carácter hidrófilo de los aislamientos celulósicos e hidrófobo del aceite la humedad se aloja principalmente en los aislamientos sólidos afectando de manera negativa a la expectativa de vida del transformador. A continuación se describen los efectos de la humedad en los aislamientos celulósicos del transformador, así como las fuentes de contaminación de humedad.

2.2.1 Efectos de la humedad en el aislamiento celulósico del transformador

Diversos estudios reportan el efecto negativo de la humedad en la expectativa de vida de los aislamientos celulósicos de los transformadores eléctricos [18, 25, 45, 52, 59, 74]. El efecto de la humedad en la degradación de los aislamientos es tal que algunos autores estiman que la vida mecánica de los aislamientos celulósicos se reduce a la mitad cada vez que el contenido de humedad en estos se dobla [18, 25].

El aislamiento celulósico de un transformador de potencia se degrada por tres procesos que son la oxidación, la pirolisis y la hidrólisis. Teniendo en cuenta la energía de activación de cada una de las reacciones químicas mencionadas y las condiciones de trabajo del transformador (temperatura, contenido en oxígeno muy limitado), la hidrólisis es proceso que requiere más atención. La hidrólisis es un proceso auto acelerado, ya que la escisión de las cadenas de las moléculas de celulosa depende de los ácidos carboxílicos disociados en el agua, y tanto el agua como los ácidos carboxílicos se producen durante el propio envejecimiento de la celulosa [16].

Además de acelerar las reacciones de envejecimiento, el agua es dañina para transformador porque reduce el margen dieléctrico de sus aislamientos y el voltaje de iniciación de las descargas parciales, lo que incrementa la probabilidad de fallos inesperados. Otro de los efectos de la humedad en transformadores, es el riesgo de formación de burbujas a altas temperaturas de operación [17].

Por todo ello resulta evidente que es necesario vigilar el contenido en humedad de los transformadores, así como tomar las medidas de mantenimiento adecuadas para que los valores de humedad en el sistema papel-aceite permanezcan dentro de niveles seguros.

2.2.2 Fuentes de contaminación de humedad en los transformadores

Se reconocen tres fuentes de aportación de humedad al transformador: la humedad residual, el ingreso de humedad desde el exterior y la humedad producida por la descomposición de los propios aislamientos [17]. A continuación se describen estas fuentes de contaminación.

Humedad residual

Las piezas aislantes gruesas a base de celulosa densa y de resinas impregnadas, usadas como piezas de sujeción mecánica para los otros componentes del transformador, pueden retener gran cantidad de agua, captada por la exposición de estos aislamientos a la atmósfera durante la construcción, instalación y mantenimiento del transformador. Debido a su mayor densidad, estos aislamientos presentan tiempos de difusión de humedad altos, por lo que la humedad no es totalmente desalojada durante el secado de la parte activa del transformador en la fábrica y se libera durante la operación del transformador al cabo de varios ciclos de carga.

Ingreso de agua desde la atmósfera

Se distinguen cuatro formas:

- Exposición directa de los aislamientos a la atmósfera durante los procesos de instalación o reparación del transformador.
- Ingreso de humedad a través de pequeños poros en la cuba, en un fenómeno conocido como flujo molecular o Knudsen, que se produce cuando existe una diferencia de presión de vapor de agua entre el interior y el exterior del transformador.
- Ingreso de aire húmedo producido por la pérdida de estanqueidad de la cuba junto con una disminución de la presión interna del transformador respecto de la presión externa.
- Ingreso de humedad a través del depósito conservador del transformador. Este mecanismo de contaminación tiene un alto impacto en el contenido de humedad, en especial cuando el sistema de preservación del transformador es del tipo “respiración libre”.

Generación interna de agua por la descomposición de la celulosa y del aceite

El envejecimiento de la celulosa consiste en la descomposición de la misma por la escisión de las cadenas moleculares y la consiguiente generación de subproductos como agua y compuestos furánicos. El proceso de descomposición y la consiguiente generación de agua son más intensos en las cercanías de los denominados “puntos calientes” que comprenden alrededor del 5% del total del aislamiento sólido. Otro mecanismo que aporta agua a los aislamientos, aunque en menor proporción que la descomposición de la celulosa, es la oxidación del aceite [17]. La Figura 2.3 muestra los resultados de varios estudios experimentales sobre el aumento del contenido de agua en el aislamiento de celulosa como resultado de su propia descomposición.

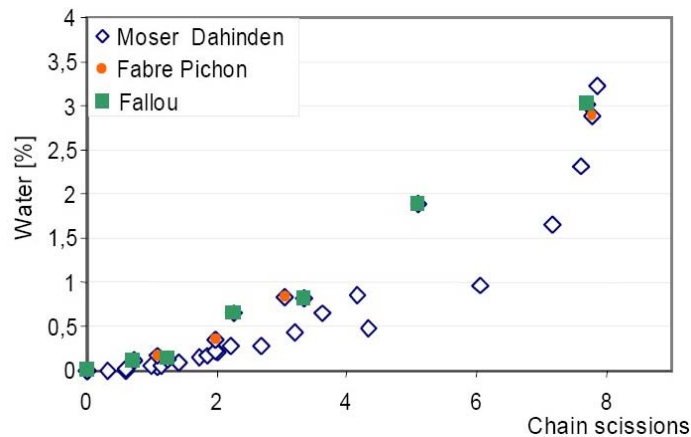


Figura 2.3 Incremento del contenido de agua en la celulosa como función de la escisión de sus cadenas moleculares, tomada de [17].

2.3 Dinámica de la humedad en el transformador

Tal y como se ha comentado, en el interior de un transformador de potencia coexisten aceite y aislamiento celulósico. Ambos materiales tienen un comportamiento muy distinto en lo que a la humedad se refiere. Los aislamientos celulósicos son hidrófilos, mientras que el aceite es altamente hidrófobo. Es por ello que en el interior de un transformador la mayor parte de la humedad está contenida en el aislamiento sólido, y solo una pequeña parte se encuentra en el aceite. Sin embargo, tal y como se analizará a continuación, el reparto de humedad entre los aislamientos celulósicos y el aceite no es estático, sino que depende de las condiciones de operación del transformador.

2.3.1 Adsorción y desorción de humedad en los aislamientos celulósicos

Tal como se ilustra en la Figura 2.4, la estructura interna de los aislamientos celulósicos es un entramado de fibras de celulosa y espacios de poros inter e intra fibras que forman un laberinto [8, 97].

La adsorción de humedad en los aislamientos celulósicos se inicia en su superficie y en los microcapilares formados por las fibras de celulosa, a través de las estructuras polares o sitios activos. Cuando las moléculas de agua en forma de vapor se unen a estos sitios activos, mantienen un movimiento limitado gracias a la atracción electromagnética de estas porciones polares de la celulosa. Esto ocurre hasta que otras moléculas de agua ocupan todos los sitios activos disponibles en la totalidad de la superficie expuesta, formando una capa de moléculas de agua, conocida como monocapa.

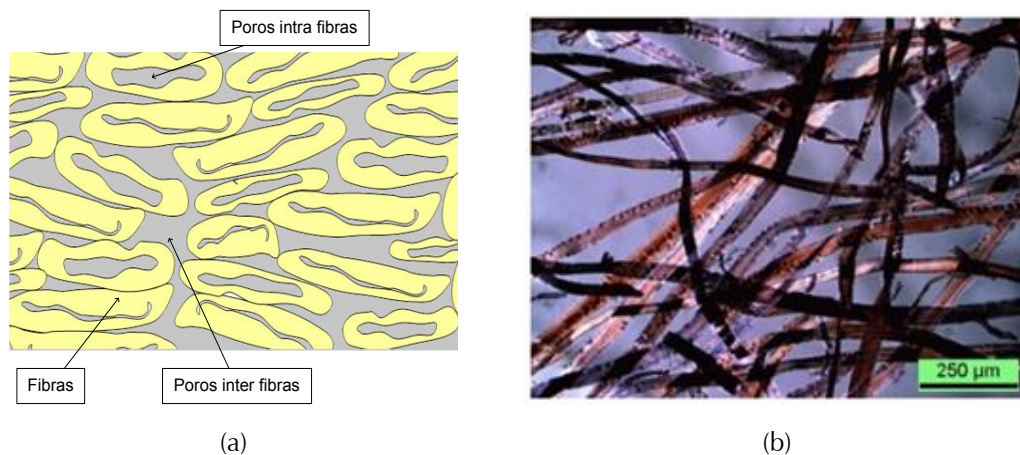


Figura 2.4 Aislamiento celulósico (a) estructura, (b) vista microscópica, tomada de [38].

Si la concentración de moléculas de agua en la superficie supera el número de sitios activos, las moléculas sobrantes presionan a las de la capa superficial hacia el interior del aislamiento, forzándolas a ser adsorbidas por las moléculas de celulosa del interior y de nuevo se forma una capa en la superficie del aislamiento. A esta fase del proceso se le conoce como multicapa. Si hay suficiente cantidad de moléculas de agua disponibles, el proceso se repetirá hasta alcanzar el equilibrio. La Figura 2.5 esquematiza el proceso de adsorción del agua por las estructuras polares de la celulosa.

Un proceso similar se presenta cuando se produce la desorción del agua desde el interior hacia el exterior del aislamiento, pero a diferencia de la adsorción, para que éste se inicie, se requiere una cierta energía de activación que por lo general es

aportada por un incremento de la temperatura. Por esta razón, al aumentar la temperatura la cantidad de agua que puede admitir el papel se reduce.



Figura 2.5 Adsorción de las moléculas de agua en la celulosa. (a) monocapa, (b) multicapa.

Ambos procesos, adsorción y desorción se pueden caracterizar por curvas denominadas de sorción isotérmica, que para el caso de los materiales celulósicos tienen forma de “S” (Figura 2.6). La curva de sorción isotérmica puede representarse de manera general mediante la ecuación 2.1 [17], que se deduce de la teoría BET (por sus autores Brunauer-Emmett-Teller).

$$Y = \frac{W}{W_k} = \frac{k_B \cdot RH}{(1 - RH) \cdot (1 - RH + k_B \cdot RH)} \quad 2.1$$

$$RH = \frac{p}{P_{sat}} \quad 2.2$$

donde:

- Y : Número de capas de moléculas de agua adsorbidas
- W : Contenido de agua
- W_k : Contenido de agua correspondiente a una monocapa completa
- k_B : Representa la probabilidad de que una molécula adsorbida pueda abandonar el sitio activo que la retiene
- RH : Humedad relativa de presión de vapor de agua
- p : Presión de vapor de agua en la vecindad de los sitios activos
- P_{sat} : Presión de saturación de agua en el medio circundante (aire, vacío, etc.)

En la teoría BET original, k_B es un parámetro variable solo dependiente de la temperatura. Sin embargo, los estudios de Boer, reportados en [17, 117], indican que

en el caso de los aislamientos celulósicos este parámetro también presenta dependencia respecto de la presión de vapor de agua.

En la curva de sorción isotérmica de la Figura 2.6, se observa histéresis en los procesos de adsorción y desorción. Tal y como se ha comentado la histéresis se debe a la energía de activación que se requiere, en el caso de los procesos de desorción, para desligar las moléculas de agua adheridas a los sitios activos de las moléculas de celulosa. También se puede observar que la curva de sorción isotérmica presenta tres zonas diferentes: las dos primeras corresponden a los mecanismos de monocapa y multicapa y la tercera zona corresponde a altos valores de humedad en donde se empieza a diferenciar agua en forma libre.

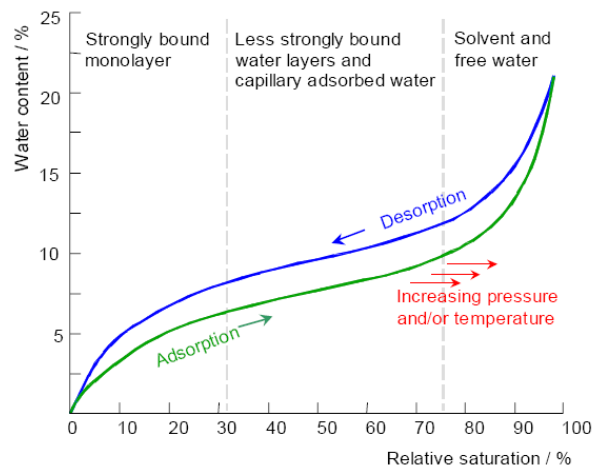


Figura 2.6 Curva general de sorción isotérmica, tomada de [15].

La constante de tiempo de migración de humedad en los aislamientos celulósicos depende de las características del material así como de las condiciones ambientales a las que estén sometidos. Gasser [38], realizó un estudio experimental para caracterizar en qué sentido variaba la constante de tiempo en función de distintos factores como el espesor o la densidad. Los resultados de dicho estudio se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Variabilidad de la constante de tiempo de adsorción de humedad

Factor	Variación	Constante de tiempo
Espesor de la muestra	Aumento	aumenta
Densidad de la muestra	Aumento	aumenta
Saturación relativa en la superficie	Aumento	disminuye
Temperatura	Aumento	disminuye
Impregnación de aceite	Impregnado	aumenta

2.3.2 Solubilidad del agua en el aceite

El aceite dieléctrico mineral usado comúnmente en los transformadores tiene poca afinidad con el agua y únicamente admite en disolución unos pocos cientos de partes por millón (ppm) de agua respecto del peso del aceite. Por encima de este valor, conocido como límite de saturación, el agua no puede disolverse y se presenta en forma libre.

El límite de saturación del aceite es variable con la temperatura y su dependencia se puede modelar según la ley de Arrhenius usando expresiones como las mostradas en las ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$W_{s-oil} = 10^{A-B/T_K} \quad 2.3$$

$$W_{s-oil} = e^{A'-B'/T_K} \quad 2.4$$

donde:

- W_{s-oil} : Límite de saturación del aceite (ppm)
- T_K : Temperatura del aceite (K)
- A, B : Coeficientes de ajuste obtenidos experimentalmente
- A', B' : Coeficientes de ajuste obtenidos experimentalmente

En la literatura se encuentran distintos valores para los coeficientes de las ecuaciones 2.3 y 2.4, los más citados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.3 Coeficientes de la ecuación 2.3 y 2.4, tomados de [25, 81].

Autor	A	B
Oommen	7,42	1670
Griffin	7,09	1567
Shell Company	7,3	1630
Autor	A'	B'
Davidov y Roizman	17,08	3876
Fofana et al	19,2	3805

En la Figura 2.7, se ha representado el límite de saturación del aceite en función de la temperatura, de acuerdo a algunos de los valores reportados en las tablas anteriores. Como se observa, el límite de saturación del aceite aumenta con la temperatura.

Además con el envejecimiento del aceite se producen subproductos polares afines al agua, que hacen que el límite de saturación del aceite se modifique a medida que éste envejece.

Para tener en cuenta el cambio en el valor del límite de saturación del aceite con el envejecimiento, Mladenov [81] propone la ecuación 2.5. En esta ecuación se incluye la dependencia del valor de saturación del aceite con el contenido de compuestos aromáticos y el número de acidez.

$$W_{s-oil} = e^{A' - B'/T_K + C \cdot A_r + D \cdot A_n} \quad 2.5$$

donde:

A_r : Contenido total de compuestos aromáticos (%)

A_n : Número de acidez (KOH/g)

C, D : Constantes obtenidas experimentalmente

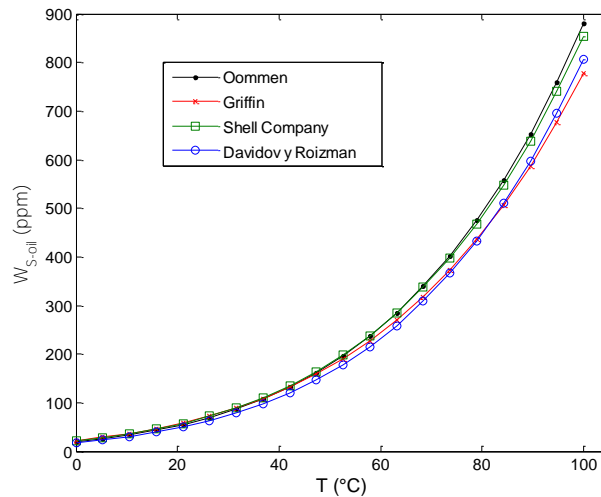


Figura 2.7 Gráfica del límite de saturación del aceite en función de la temperatura.

2.3.3 Equilibrio de humedad en el sistema papel-aceite

La humedad presente en un transformador se encuentra distribuida entre el papel y el aceite. Tal y como se ha descrito en las secciones anteriores, las cantidades de agua que admiten el papel y el aceite dependen de la temperatura. Por ello el sistema papel-aceite en el interior de un transformador buscará un equilibrio entre la concentración relativa de humedad del papel y del aceite, haciendo que el contenido de humedad se desplace hacia uno u otro medio dependiendo de la temperatura.

Para calcular cómo se distribuye la humedad entre el papel y el aceite, se debe tener en cuenta que si existe un equilibrio de carácter termodinámico entre los

aislamientos celulósicos y su medio circundante, se dice que debe existir también un equilibrio entre las presiones parciales de vapor de agua y por ende de concentraciones relativas entre estos dos medios. De este modo la saturación relativa de humedad en cada medio se puede definir mediante la relación dada en la ecuación 2.6.

$$RS = \frac{p}{P_{sat}} = \frac{W_c}{W_{s-c}} = \frac{W_{oil}}{W_{s-oil}} \quad 2.6$$

donde:

- RS : Saturación relativa
- P_{sat} : Presión de saturación de vapor de agua
- p : Presión parcial de vapor de agua
- W_c : Contenido de agua en el aislamiento celulósico
- W_{s-c} : Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico
- W_{oil} : Contenido de agua en el aceite
- W_{s-oil} : Valor de saturación del agua en el aceite

Diversos autores han propuesto curvas de equilibrio para determinar el contenido de humedad en los aislamientos celulósicos, en función de la humedad contenida en el aceite o de la humedad relativa del aire, dependiendo si el medio externo al papel es aceite o aire, o de la presión parcial de vapor de agua. Estas curvas, obtenidas de manera experimental, no son más que una aproximación a la curva de sorción isotérmica dada por la ecuación 2.1.

Du presentó en [25] una revisión de las diferentes curvas de equilibrio propuestas en la literatura técnica, incluidas las que ella obtuvo teóricamente al usar el método propuesto por Oommen en [88] y las curvas de Jeffries [55]. La Figura 2.8 presenta ejemplos de dos de las curvas de equilibrio de humedad en el sistema papel-aceite, encontradas en la literatura.

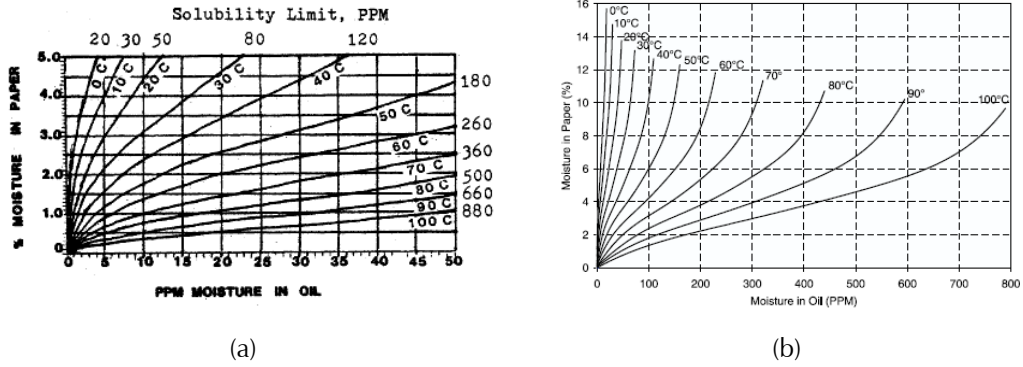


Figura 2.8 Curvas de equilibrio papel-aceite (a) curvas propuestas por Oommen [88], (b) curvas propuestas por el MIT [25].

Algunos de esos trabajos sobre curvas de equilibrio derivaron en ecuaciones que representan dichas curvas con una ecuación isotérmica del tipo Freundlich [17]. Las expresiones más usadas son las de Piper-Lamped [93, 66] y la de Fessler [32], ecuaciones 2.7 y 2.8 respectivamente.

$$C_e = \left[p \cdot e^{\left(\frac{6850}{T_K} - 21,92 \right)} \right]^{0.75} \quad 2.7$$

$$C_e = 2,173 \cdot 10^{-7} \cdot p^{0,6685} \cdot e^{\frac{4725,6}{T_K}} \quad 2.8$$

donde:

- C_e : Concentración de agua de equilibrio en el aislamiento (g H₂O/g Papel)
- p : Presión parcial de vapor de agua (mm de Hg), para la ecuación 2.7 y (atm) para la ecuación 2.8
- T_K : Temperatura absoluta (K)

Las ecuaciones de Piper-Lamped y de Fessler, expresan la concentración de humedad en el aislamiento celulósico en función de la presión parcial de vapor de agua. Sin embargo, es posible correlacionar el contenido de humedad de equilibrio en el aislamiento celulósico con el contenido de humedad del aceite empleando la medición de la saturación relativa del aceite y las relaciones de la ecuación 2.6.

Más recientemente Scala [104], propuso otra ecuación de equilibrio papel-aceite, obtenida a partir de mediciones directas en probetas de papel-aceite (ecuación 2.9).

$$C_e = 0.5 \cdot W_{s-c} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_{sat}} \right)^{\left(\frac{1377+5 \cdot T}{2635-T} \right)} + \left(\frac{p}{p_{sat}} \right)^{7.1} \right] \quad 2.9$$

$$W_{s-c} = 20,68 - 0,0608 \cdot T \quad 2.10$$

donde:

C_e : Concentración de equilibrio de agua en el aislamiento (% en peso del papel seco)

W_{s-c} : Valor de saturación de agua en la celulosa (% en peso del papel seco)

p : Presión de vapor de agua en el aislamiento (Pa)

p_{sat} : Presión de saturación de vapor de agua pura (Pa)

T : Temperatura de la celulosa (°C)

En la Figura 2.9, se presentan las curvas de concentración de equilibrio del aislamiento celulósico, a una temperatura de 90 °C, como función de la presión parcial de vapor de agua. La concentración de equilibrio (C_e), es el contenido de humedad expresado como porcentaje del peso del aislamiento seco.

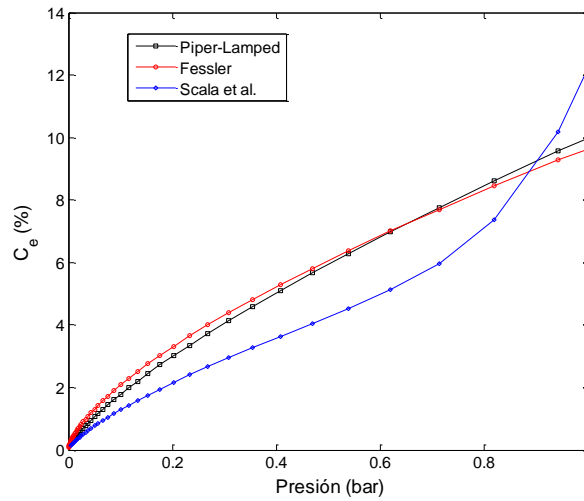


Figura 2.9 Concentración de equilibrio del aislamiento celulósico (C_e) a una temperatura de 90 °C.

Los diagramas de equilibrio como los mostrados en la Figura 2.8, son empleados comúnmente para estimar el contenido de humedad del aislamiento sólido, a partir de la medida del contenido de humedad del aceite. Este procedimiento según [17], puede llevar a errores en dicha estimación por los siguientes factores:

- Los diagramas sólo son válidos en condición de equilibrio termodinámico y esta condición no necesariamente se cumple en el momento de tomar la muestra de aceite.
- La contaminación de la muestra durante el transporte al laboratorio y los errores de la medición misma de humedad por el método de Karl-Fischer.
- Dificultad en la lectura de las curvas de equilibrio en las regiones de baja humedad o baja temperatura.
- Estimaciones diferentes al emplear distintas gráficas de equilibrio.
- Distribución no homogénea de la humedad, debido a los gradientes de temperatura en el interior del transformador.
- El equilibrio depende de la capacidad de adsorción de agua por parte de la celulosa y del aceite, y estos valores pueden modificarse con el envejecimiento de cualquiera de estos materiales.
- Las curvas de equilibrio solo tienen validez plena para los materiales con los cuales fueron determinadas

En la operación del transformador existe por naturaleza un desequilibrio de tipo termodinámico, ya que en todo momento se presentan diferencias de temperatura entre los aislamientos sólidos y el aceite. Además la temperatura de ambos se modifica continuamente con la variación de la carga del transformador y de las condiciones de temperatura ambiente.

Como se mencionó anteriormente el límite de saturación de agua en el aceite se incrementa con la temperatura, mientras que al aumentar la temperatura, la capacidad de adsorción de agua por parte de la celulosa disminuye. Esto hace que con los cambios de temperatura exista un continuo flujo de humedad entre el papel y el aceite, siempre tratando de encontrar el equilibrio entre los dos medios; es decir, buscando que las saturaciones relativas sean iguales. Tal como se ilustra en la Figura 2.10, al aumentar la temperatura del papel, habrá un flujo de humedad desde los aislamientos sólidos hacia el aceite y al disminuir la temperatura, el flujo de humedad seguirá la dirección opuesta.

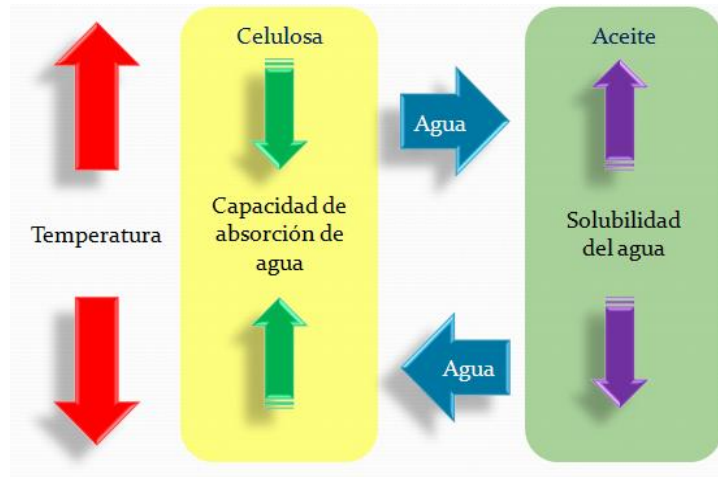


Figura 2.10 Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite.

2.3.4 Distribución de la humedad en el transformador

En un transformador en servicio existe una distribución no homogénea de temperatura que da lugar a una distribución de humedad no homogénea en el aislamiento sólido. Las zonas más calientes del aislamiento celulósico tienen un menor contenido de humedad y las más frías por el contrario, tendrán una mayor concentración de humedad. En la Figura 2.11 se presenta un ejemplo de la distribución de temperatura y humedad en un transformador de potencia.

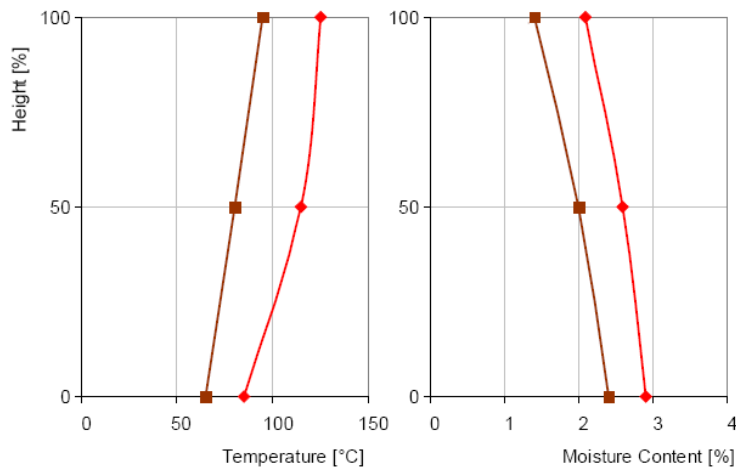


Figura 2.11 Ejemplo de distribución de temperatura y humedad de un modelo de devanado, tomado de [17].

Como se indicó, los aislamientos celulósicos en el transformador pueden clasificarse de acuerdo a la temperatura de operación y espesor, como aislamientos delgados y calientes, delgados y fríos, y gruesos.

Los aislamientos delgados y calientes, debido a su elevada temperatura, tienen en general un contenido en humedad reducido y por su menor densidad, la humedad en ellos tiene una alta movilidad. Además son los aislamientos que mayor variación de temperatura experimentan con los cambios de la carga del transformador, por lo que tienen un constante intercambio de humedad con el aceite.

Los aislamientos delgados y fríos, al tener una temperatura de operación similar a la del aceite y densidades intermedias, se constituyen como el principal almacén de agua para intercambio con el aceite.

A pesar de que un 60% del agua contenida en un transformador se almacena en sus aislamientos gruesos, éstos suelen tener una baja participación en la dinámica de humedad ya que presentan poca superficie de contacto con el aceite en relación a su volumen. Además estos aislamientos están constituidos por materiales celulósicos de elevada densidad y adicionalmente suelen presentar temperaturas de operación más reducidas que otras zonas del transformador. Por todo ello, las constantes de tiempo de difusión de humedad de estos elementos suelen ser extremadamente altas incluso del orden de años.

En la Figura 2.12 se muestran las cantidades típicas de cada tipo de aislamiento en un transformador de potencia respecto de la masa total del aislamiento sólido, así como el reparto estimado de humedad entre ellos.

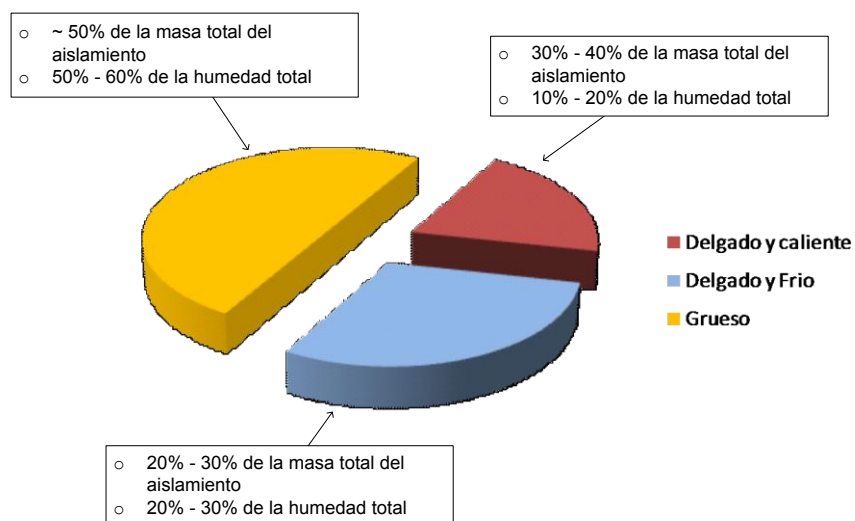


Figura 2.12 Distribución del aislamiento sólido en un transformador.

2.4 Modelado de la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos del transformador

El proceso migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos de un transformador es un proceso complejo en el que se encuentran interrelacionados los fenómenos de transferencia térmica y transporte de masa. La adsorción y la desorción de humedad en los aislamientos sólidos del transformador pueden ser modeladas matemáticamente mediante las leyes de Fourier, para transferencia térmica, y las leyes de difusión de Fick en el caso del transporte de masa.

2.4.1 Modelo matemático para el análisis de la migración de humedad

Dado que los fenómenos térmicos se rigen por unas constantes de tiempo mucho menores que las del proceso de difusión, al estudiar la migración de humedad en un transformador se puede considerar que la temperatura local del aislamiento sólido es constante [2,5], entonces el fenómeno predominante durante la migración de humedad es el de transporte de masa. A efectos prácticos, el modelo matemático con el que se analiza la migración de humedad en el interior del sólido, se puede simplificar al considerar solamente la difusión de humedad.

La humedad en el interior de los materiales celulósicos como el papel, se puede mover en forma gaseosa a través del entramado de poros, o en fase líquida bien sea por capilaridad a través de los poros intra e inter fibras, por flujo molecular o Knudsen y por difusión superficial en las paredes de las fibras [97]. Ninguno de estos mecanismos de transporte prevalece a través de todo el proceso de migración de humedad, sin embargo, el mecanismo de difusión ha sido el más comúnmente usado para interpretar las observaciones experimentales. Es importante notar que tanto el movimiento por difusión como el capilar son provocados por la misma fuerza motriz, en este caso el gradiente de concentración de humedad. Por tanto la adopción de un modelo de difusión parece justificada ya que la difusión de humedad tiene en cuenta todos los mecanismos de transporte involucrados en el la migración de humedad [126].

Las leyes de Fick, con las que se modelan matemáticamente los procesos de difusión de materia o de energía [19], se basan en el hecho de que al existir diferencias de concentración de cualquier especie (sustancia o temperatura), el movimiento de la sustancia (humedad en nuestro caso), se llevará a cabo desde las

regiones con mayor concentración hacia las regiones de menor concentración. Es decir, el flujo de humedad irá en sentido opuesto al gradiente de concentración de humedad y si éste es débil, podrá aproximarse de manera general por el primer término de la serie de Taylor resultando la primera ley de Fick.

$$F = -D \cdot \nabla c \quad 2.11$$

donde:

- F : Flujo de sustancia
- D : Coeficiente de difusión o difusividad
- c : Concentración local de humedad

Considerando la ley de conservación para la concentración de humedad y aplicando a esta el teorema de Stokes, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot F = 0 \quad 2.12$$

Combinando las ecuaciones 2.11y 2.12 se obtiene la segunda ley de Fick o ecuación de difusión:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D \cdot \nabla^2 c = 0 \Rightarrow \frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad 2.13$$

Suponiendo que la difusión de humedad se produce en una sola dirección, por ejemplo en el sentido de la coordenada x , el movimiento de humedad dentro del sólido en sus dos fases (líquida y gaseosa), puede modelarse mediante las ecuaciones 2.14 y 2.15.

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \cdot \frac{\partial c_w}{\partial x} \right) - I \quad 2.14$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \cdot \frac{\partial c_v}{\partial x} \right) + I \quad 2.15$$

donde:

- c_w : Concentración de humedad en forma líquida
- c_v : Concentración de humedad en forma de vapor
- D_w : Coeficiente de difusión de humedad en fase líquida
- D_v : Coeficiente de difusión de humedad en fase de vapor

I : Cantidad de humedad que pasa de la fase líquida a la fase de vapor

Estas ecuaciones representan los diferentes mecanismos de transporte de humedad en el interior de un sólido. Lamentablemente, no es fácil determinar los valores particulares del coeficiente de difusión para cada fase, ni la cantidad de agua que cambia de una fase a la otra [124], por lo que la aplicación de este modelo no suele ser viable.

Para hacer viable la utilización de un modelo de difusión, se combinan las dos ecuaciones anteriores, eliminando el término I que hace referencia a la vaporización. Adicionalmente si no se discrimina la humedad en sus dos fases sino que se considera en forma global (agua líquida más vapor), resulta la ecuación 2.16, en la cual el coeficiente D es el coeficiente efectivo de difusión de humedad, y c la concentración local de humedad.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad 2.16$$

Se puede considerar entonces, que el coeficiente de difusión efectivo es una combinación de un coeficiente de difusión de la humedad que se mueve en forma de vapor a través del entramado de espacios vacíos, y de otro que considera el movimiento del agua en forma líquida, la cual se mueve principalmente a través de las fibras [97].

La ecuación 2.16 puede emplearse para modelar matemáticamente la difusión de humedad en los aislamientos sólidos de los transformadores de potencia. En el caso de los transformadores, de acuerdo a Almendros [2], los gradientes de concentración de humedad en los aislamientos en el sentido transversal son mucho mayores que en el sentido vertical ($\nabla c_x \gg \nabla c_y$), y por ello es posible considerar la difusión de humedad como un proceso unidireccional. Esto se debe a la relación de aspecto de los transformadores de potencia, donde las alturas de los arrollamientos (entre 1 m y 2 m) superan considerablemente los espesores de los aislamientos sólidos cuyos valores máximos se sitúan en unas pocas decenas de milímetro.

2.4.2 Modelo de elementos finitos para el análisis de migración de humedad

Estudios de diversos autores [5, 25, 40, 46], han mostrado que el coeficiente de difusión efectivo de los aislamientos celulósicos presenta dependencia respecto de la concentración de humedad. Por ello, la ecuación de difusión (ecuación 2.16) que modela el movimiento de la humedad en el interior de los aislamientos de los transformadores corresponde a una ecuación diferencial de segundo orden de tipo no lineal. Para resolver dicho modelo de difusión puede emplearse un método analítico que aproxime la solución, o bien emplear un método numérico como las diferencias finitas o los elementos finitos [20, 126].

Como se ha mostrado anteriormente, la difusión de humedad en el aislamiento sólido del transformador de potencia puede asumirse unidireccional, considerando así que el agua se mueve en la dirección del espesor del aislamiento. Por ello, en el modelo de elementos finitos, el aislamiento celulósico puede representarse mediante una geometría unidimensional cuya longitud corresponde con su espesor. En cuanto a las propiedades físicas, el aislamiento es caracterizado por su coeficiente de difusión de humedad mediante una expresión dependiente de variables como la temperatura y la concentración local de humedad. Las entradas independientes al modelo son la temperatura del aislamiento y la concentración inicial de humedad del aislamiento.

Las condiciones de frontera varían en función de distintas circunstancias como podrían ser el medio externo con el que hace contacto el aislamiento, la temperatura en la interfase, la saturación relativa, etc. Por ejemplo, si se analiza la migración de humedad de un aislamiento celulósico en contacto con aceite circulando en su superficie, podría emplearse como condición de frontera la concentración de equilibrio determinada a partir de curvas de equilibrio como las mostradas en la Figura 2.8, o bien mediante algún tipo de expresión matemática como las mostradas en las ecuaciones 2.7 a 2.9.

La salida del modelo MEF, es la evolución en el tiempo del perfil de concentración de humedad (concentración local a lo largo del espesor del aislamiento). En la Figura 2.13 se presenta el esquema general del modelo MEF para simulación de la migración de humedad, cuando el aislamiento tiene una de sus caras en contacto con los conductores u otras partes impermeables, y en consecuencia la dirección de la difusión de humedad es en un solo sentido. También

puede evaluarse el caso de aislamientos que no están en contacto con conductores, en este caso la difusión de humedad tiene lugar a través de las dos fronteras.

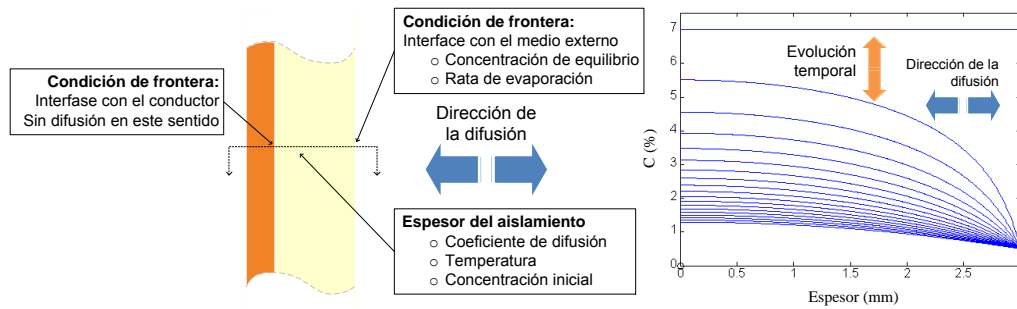


Figura 2.13 Esquema del modelo por elementos finitos para el análisis de la difusión de humedad en el aislamiento sólido.

2.5 Aplicaciones del modelado de la migración de humedad en los aislamientos celulósicos.

Los modelos de difusión para el análisis de la difusión de humedad en el interior de los aislamientos sólidos tienen utilidad práctica en diferentes aplicaciones como son el análisis de los procesos de secado de los aislamientos celulósicos, en la estimación del contenido de humedad de los aislamientos celulósicos de transformadores en servicio y la calibración de sensores para la monitorización de la humedad. A continuación se hace una breve descripción del uso de los modelos de difusión de humedad en los aislamientos celulósicos para las aplicaciones antes mencionadas.

2.5.1 Análisis de procesos de secado del aislamiento de los transformadores

Como se ha comentado anteriormente, durante la construcción, reparación y operación de los transformadores, los aislamientos celulósicos adsorben humedad por diversos mecanismos, y para garantizar la integridad de un transformador es importante que su contenido en humedad sea lo más bajo posible. La Tabla 2.4, tomada de la Guía IEEE Std 62-1995 [51], permite cualificar el estado del aislamiento celulósico del transformador en función de su contenido de humedad.

Para mantener el contenido de humedad de los aislamientos celulósicos del transformador en valores seguros, es necesario llevar a cabo procesos de secado que pueden ser realizados en fábrica, durante la construcción o después de la reparación

de los mismos, o como parte del mantenimiento, realizándose en este caso en el lugar de instalación del equipo. Tras los secados en fábrica el contenido de humedad de los aislamientos sólidos es típicamente inferior a 0,5% respecto al peso del aislamiento seco [16, 17]. Sin embargo, durante la vida del transformador el contenido de humedad puede alcanzar valores por encima del 5%, haciendo insegura y antieconómica su operación.

Tabla 2.4 Estado del aislamiento sólido del transformador en función de su contenido de humedad, tomada de [51].

Contenido de humedad (% del peso de la muestra seca)	Condición del aislamiento
0-2	Seco
2-4	Húmedo
> 4,5	Excesivamente húmedo

Todos los métodos de secado de los aislamientos sólidos celulósicos de los transformadores de potencia, ya sean realizados en fábrica o en campo, se basan en crear un desequilibrio termodinámico. Este desequilibrio se logra al generar gradientes de temperatura, de concentración de humedad o de presión de vapor de agua entre los aislamientos sólidos y su medio circundante.

Para forzar la desorción de humedad desde el aislamiento sólido durante el secado, es necesario que se produzca alguna de las siguientes condiciones:

- Que el aislamiento celulósico tenga una mayor temperatura que la de su medio circundante.
- Que el aislamiento tenga una mayor presión de vapor de agua que el medio circundante.
- Que la saturación relativa de humedad del aislamiento celulósico sea menor que la del medio circundante. Este último fenómeno se favorece además si el medio circundante es hidrófilo.

Estas tres condiciones pueden presentarse de manera simultánea durante el secado. En cualquiera de los casos el sistema aislamiento celulósico-medio circundante siempre tenderá hacia el equilibrio termodinámico forzando así la migración de humedad.

Cuando aparece un desequilibrio termodinámico, la humedad es forzada a moverse desde el interior del aislamiento hacia el medio circundante y de allí es transportada hacia el exterior del transformador y desalojada del mismo.

Cómo medio circundante para los procesos de secado es posible usar gases o líquidos. Dentro de los gases se reporta el uso de aire y vapores de keroseno [44, 46, 64]. En cuanto a los líquidos, habitualmente se emplea el propio aceite mineral del transformador. En algunas referencias [79, 121], se menciona la posibilidad de emplear estéres dieléctricos, que tienen una humedad de saturación mayor que la de los aceites minerales.

También es habitual secar los transformadores bajo una atmósfera de vacío. En este caso se desaloja la mayor parte del aceite de la cuba del transformador, y mediante una bomba de vacío se lleva el interior de la cuba a una presión relativa negativa respecto de la presión atmosférica externa.

Otro aspecto importante a considerar en los procesos de secado de los transformadores es la forma en que se aporta calor al aislamiento para forzar el desequilibrio termodinámico. Se distinguen tres métodos para aportar calor a los aislamientos sólidos durante el secado de los transformadores eléctricos:

- Desde el medio circundante y durante el proceso de extracción de humedad. Por ejemplo al usar aire caliente durante el secado.
- Calentamiento del aislamiento previo al proceso de extracción de humedad. Por ejemplo haciendo circular aceite caliente antes de un proceso de secado mediante vacío.
- Calentamiento por conducción, al hacer circular corriente por los arrollamientos.

La aportación de calor al aislamiento mediante corriente circulando por los arrollamientos se puede lograr con la propia carga del transformador en los denominados secados con el transformador en servicio (secados on-line), o bien cortocircuitando uno de los devanados y aplicando tensión reducida al otro en los secados con el transformador fuera de servicio. En este último caso se puede usar una fuente de tensión de baja frecuencia, con lo cual el valor de reactancia de dispersión del transformador se reduce y por tanto la potencia requerida de la fuente de alimentación es menor. Esta técnica se conoce como LFH (Low Frequency Heating) y es ampliamente usada en la actualidad.

Los métodos de secado de transformadores más empleados [1, 4, 10, 44], son:

- Circulación de aceite

- Circulación de aire caliente
- Vacío fuerte con aplicación de calor
- Fase de vapor de keroseno

En el Apéndice A se describen estos métodos de secado con mayor detalle.

En un trabajo previo, Almendros [2], implementó una serie de modelos de elementos finitos para simular algunos de los procesos de secado de los aislamientos celulósicos de transformadores de potencia. Como se ha demostrado en dicho estudio estos modelos de elementos finitos pueden usarse para estimar la evolución en el tiempo de la concentración de humedad en el interior del aislamiento durante el secado, permitiendo evaluar parámetros como los tiempos de secado requeridos, las humedades finales alcanzadas y la influencia de las condiciones impuestas en el proceso de secado.

2.5.2 Determinación del contenido de humedad en los aislamientos celulósicos de un transformador en servicio

Actualmente la determinación del contenido de humedad de los aislamientos sólidos de un transformador en servicio puede realizarse de tres formas:

La primera forma para la determinación del contenido de humedad de un transformador en servicio consiste en tomar muestras del aceite del transformador, determinar su contenido de humedad mediante el análisis químico del Karl Fischer, y a través de las curvas de equilibrio inferir el contenido de humedad del aislamiento. Este método, como se indica en [17], puede llevar a grandes errores en la estimación de humedad entre otras razones porque el uso de las curvas de equilibrio únicamente tiene validez si el sistema papel aceite se encuentra en condición de equilibrio termodinámico. Ésta es una condición difícil de encontrar en un transformador en servicio, ya que la temperatura del transformador varía constantemente en función de la carga. Otra de las razones por la cual este método puede inducir a errores es que la temperatura a la que operan los aislamientos de un transformador no es uniforme.

La segunda forma de determinar el contenido de humedad de los aislamientos celulósicos de transformadores es mediante los denominados métodos dieléctricos. Estos métodos se basan en evaluar la respuesta dieléctrica de los aislamientos del transformador para posteriormente estimar el contenido de humedad al comparar

dicha respuesta con la respuesta de un modelo matemático simplificado del transformador y utilizando los valores de la permitividad compleja obtenidos en el laboratorio sobre probetas de aislamiento [17, 39, 100]. Entre las pruebas dieléctricas empleadas para la determinación del contenido de humedad de los aislamientos celulósicos del transformador se encuentran la tangente delta [4], las corrientes de polarización y despolarización o PDC [67, 101, 107], la medición de voltaje de recuperación o RVM [22, 100, 116], y la espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia o FDS [12, 29].

La tercera forma de estimar el contenido de humedad en el aislamiento del transformador es mediante el uso de sensores capacitivos con los cuales se mide de forma continua la variación de temperatura y saturación relativa del aceite. Con la monitorización continua de estas dos variables, y conociendo la temperatura de los devanados es posible, usar las curvas de concentración de equilibrio de tal manera que al aplicar una función ponderadora, éstas reflejen la adsorción y desorción de humedad del aislamiento [36, 37, 63, 103].

Los modelos matemáticos de difusión de humedad, para análisis de la migración de humedad en el aislamiento celulósico del transformador no solo podrían emplearse para estimar el contenido de humedad en los aislamientos celulósicos, sino también para analizar la dinámica de humedad entre el sistema papel-aceite durante la propia operación del transformador. Para ello se requeriría medir o estimar de manera continua la temperatura de los devanados, la temperatura del aceite y la saturación relativa del aceite y usarlas como entradas del modelo de elementos finitos. En la referencia [48], se da un ejemplo de esta aplicación.

2.5.3 Calibración de sensores para la estimación del contenido de humedad del aislamiento sólido

Existe un campo de investigación de renovado interés, relacionado con el desarrollo de sensores para la determinación del contenido de humedad en aislamientos celulósicos de transformadores. El funcionamiento de estos sensores se basa en analizar el cambio de las propiedades eléctricas del aislamiento como la permitividad o la tangente de delta de muestras de celulosa, en función de su contenido de humedad [26, 69, 75]. Para el correcto funcionamiento de este tipo de sensores, se requiere calibrar la medida de las variables eléctricas con la distribución

de humedad en el interior del aislamiento. La medición experimental de dicha distribución es difícil, sin embargo sería posible estimarla usando el modelo de simulación para análisis migración de humedad. Esta es la solución empleada por Du [26] y Li [69].

2.6 Efecto del valor del coeficientes de difusión en la estimación de la migración de humedad en los aislamientos celulósicos

La precisión de la estimación de la migración de humedad en los aislamientos celulósicos mediante modelos matemáticos de difusión, depende fundamentalmente del valor del coeficiente de difusión de humedad empleado en las simulaciones. Distintos investigadores como Guidi y Fullerton [40], Foss [33], Howe y Asem [47, 4], y Du [27], han estimado de forma experimental el valor del coeficiente de difusión de humedad en materiales aislantes celulósicos como papeles y cartones prensados, empleando para ello diferentes metodologías.

Como resultado de los trabajos antes mencionados, se encuentran en la literatura distintos valores del coeficiente de difusión representados mediante expresiones matemáticas, tablas o simples curvas experimentales que relacionan la dependencia del coeficiente de difusión con la concentración de humedad local y con la temperatura del propio aislamiento. En el Capítulo 3 se presentan los valores del coeficiente de difusión de humedad para aislamientos celulósicos propuestos por los diversos autores y se hace una revisión detallada de las metodologías experimentales empleadas por estos.

Para comparar el efecto del valor del coeficiente de difusión en la estimación de la migración de humedad de aislamientos celulósicos de los transformadores, se simuló el secado de un aislamiento de papel de 5 mm de espesor empleando los valores del coeficiente de difusión propuestos por los distintos autores.

Se evaluaron dos casos de estudio: en el primer caso se simuló la desorción de humedad en un aislamiento de papel no impregnado de aceite, y en el segundo caso en un aislamiento de papel impregnado.

Para la estimación de la desorción de humedad, se empleó el modelo de simulación de elementos finitos descrito en [2], que fue implementado para su solución en el software de elementos finitos *Comsol Multiphysics 3.5a*.

Como condición de frontera en la interfase entre el papel y el medio externo, se consideró una concentración de equilibrio de 0,5% ($C_e = 0,5$), que en un secado por circulación de aceite (de acuerdo a la ecuación 2.8), podría corresponder por ejemplo, con un aceite circulando a una temperatura de 80 °C y con un contenido de humedad de 7,2 ppm.

En el interior del aislamiento de papel se supuso una concentración de humedad inicial de 3% ($c_0 = 3$).

La temperatura en el aislamiento se supuso uniforme en todo su espesor con un valor de temperatura de 62 °C. Este valor de temperatura es correspondiente con empleado por Howe y Asem en sus experimentos. Los resultados de los dos casos de estudio se muestran en las Figuras 2.14 y 2.15.

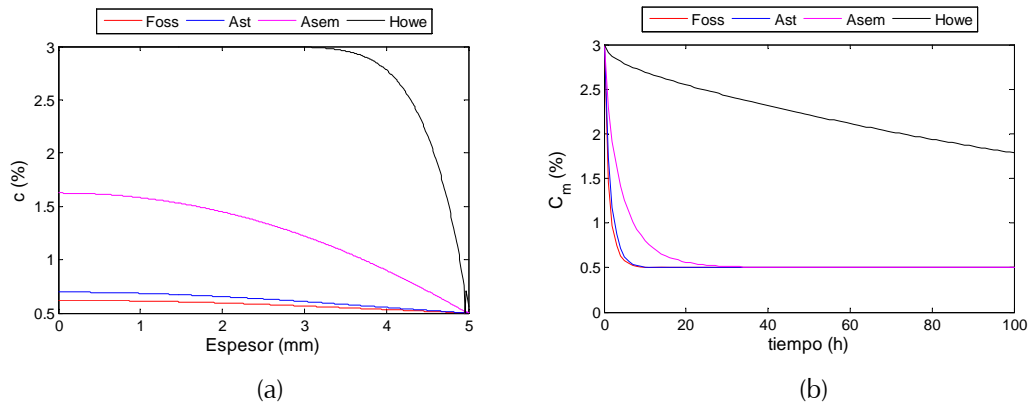


Figura 2.14 Estimación de la desorción de humedad para aislamiento de papel sin impregnar. (a) Perfiles de concentración, (b) Curvas de secado.

La Figura 2.14 (a) muestra los perfiles de concentración de humedad del aislamiento de papel sin impregnar tras 5 horas de secado. Como se puede observar, los resultados que se obtienen al aplicar los coeficientes determinados por los distintos autores son diferentes.

En la Figura 2.14 (b) se han dibujado las curvas de secado del aislamiento que muestran la evolución de la concentración promedio de humedad del aislamiento en función del tiempo. En estas curvas de secado se observa cómo la desorción de humedad estimada con el coeficiente de Howe es más lenta y al cabo de 100 horas aún no ha alcanzado el valor de equilibrio. Este comportamiento es debido a un menor valor de coeficiente de difusión. De igual forma se aprecia que las curvas de secado estimadas con los coeficientes de Foss y Ast son similares, alcanzando el valor

de concentración de equilibrio tras 15 horas de secado. Finalmente al usar el valor del coeficiente de difusión reportado por Asem se requiere un tiempo aproximado de 40 horas para que el aislamiento alcance el valor de concentración de equilibrio.

La Figura 2.15 muestra la estimación de la desorción de humedad durante el secado del aislamiento de papel impregnado de aceite, obtenida con el modelo de elementos finitos. Los perfiles de concentración de humedad mostrados en la Figura 2.15 (a) son los estimados tras 20 horas de secado. Al igual que en papeles sin impregnar se observan diferencias en los resultados obtenidos al emplear los diferentes valores de coeficiente de difusión de humedad.

La Figura 2.15 (b) muestra cómo al estimar las curvas de secado con el coeficiente de difusión de Asem, el aislamiento impregnado de aceite alcanza la concentración de humedad de equilibrio tras 50 horas de secado, mientras que con los otros dos valores del coeficiente de difusión esta condición de equilibrio aún no se ha alcanzado después de 300 horas de iniciado el secado.

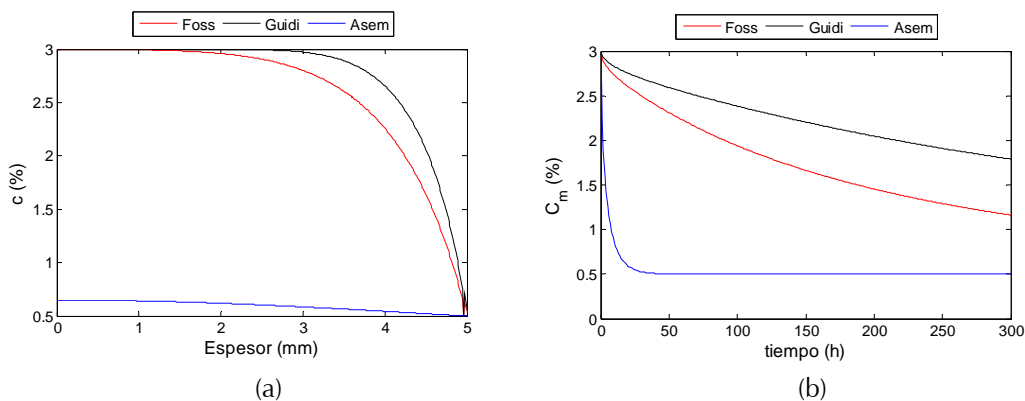


Figura 2.15 Estimación de la desorción de humedad para aislamiento de papel impregnado de aceite. (a) Perfiles de concentración, (b) concentración media.

Como se ha mostrado en este apartado, la estimación de la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos, mediante un modelo matemático de difusión, está determinada fundamentalmente por el valor del coeficiente de difusión de humedad empleado.

Una de las razones de ser de esta tesis doctoral se justifica al hilo de las grandes discrepancias en la estimación de la migración de humedad, encontradas al emplear los distintos valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos celulósicos reportados en la literatura técnica.

Otra de las razones que justifica el desarrollo de esta tesis son los resultados de estudios recientes realizados por Koch [62], y Przybylek [95], en los cuales estos autores han mostrado que el envejecimiento afecta la capacidad de adsorción de agua de los aislamientos a base de celulosa. Por tanto, es posible que la movilidad del agua en el interior de los aislamientos celulósicos también sea afectada por su envejecimiento. Esto se reflejaría en un valor del coeficiente de difusión de humedad diferente del encontrado en aislamientos celulósicos nuevos. Este aspecto también es evaluado en esta tesis doctoral.

Capítulo 3

Métodos experimentales para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos

El transporte de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos puede analizarse mediante un modelo matemático de difusión representado por la segunda ley de Fick. En dicho modelo matemático la movilidad del agua en el interior del sólido y su dependencia con variables como la temperatura y la propia concentración de humedad son consideradas por medio del denominado coeficiente de difusión de humedad.

En este capítulo se hace una revisión de los principales métodos experimentales que se pueden emplear para estimar el coeficiente de difusión de humedad en materiales sólidos, y se referencian algunos de los trabajos en los que se han empleado dichos métodos para la determinación de los coeficientes de difusión de humedad en diversos materiales.

Posteriormente se describen y se clasifican los métodos empleados por algunos autores para la estimación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos (papeles y cartones prensados), usados como aislamiento en transformadores de potencia.

3.1 Clasificación de los métodos para la estimación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos

Todos los métodos empleados en la estimación del coeficiente de difusión de humedad en materiales sólidos contemplan dos etapas: la primera de ellas corresponde a la parte experimental en la cual, las condiciones ambientales de las muestras del sólido bajo evaluación son modificadas para forzar el movimiento de humedad a través del material o hacia el interior o exterior de este. De esta manera se determinan algunas de las variables asociadas con el transporte de humedad en

función del tiempo como pueden ser el flujo de humedad a través del material, la absorción o desorción global de agua o la distribución de humedad en el interior de la muestra.

La segunda etapa consiste en estimar el valor del coeficiente de difusión de humedad a partir de los valores experimentales encontrados. Para ello se plantea un modelo matemático que represente la física del experimento realizado. En dicho modelo aparecerá una dependencia con el coeficiente de difusión. El coeficiente de difusión estimado será aquel que consiga una mejor correspondencia entre los valores obtenidos experimentalmente y los valores calculados mediante el modelo matemático.

Según Zogzas [127], cuando el procedimiento empleado para la estimación del coeficiente de difusión de humedad involucra el uso de métodos aproximados como los métodos numéricos, es preciso realizar un análisis estadístico de los valores obtenidos. Esto también es recomendable si en la estimación del coeficiente de difusión se emplease algún método no determinístico.

Existen distintos tipos de experimentos que pueden usarse para la determinación del coeficiente de difusión. Los más empleados son los experimentos de tipo gravimétrico y los experimentos basados en la determinación del perfil de concentración de humedad en el interior del sólido.

En los experimentos gravimétricos se registra la cantidad de masa de humedad que pasa a través del material o la variación de la masa de una muestra del material bajo estudio durante un proceso de secado o humectación. Este tipo de ensayos gravimétricos pueden subdividirse en experimentos de permeación, de cinética de adsorción o desorción y de secado.

Los experimentos basados en la determinación de los perfiles de concentración de humedad en el sólido se pueden clasificar según la técnica empleada para la obtención de los perfiles. Algunos de estos métodos son la obtención directa por seccionado y pesado de la muestra, las técnicas de tipo radiográfico, la resonancia magnética nuclear, el análisis químico o el uso de sensores especiales como los dielectrométricos. Existen otras técnicas que no serán expuestas en este trabajo de tesis como son el uso de trazadores radiactivos o el uso de colorantes.

En cuanto a los métodos para la estimación de los valores del coeficiente de difusión o segunda etapa, estos se pueden clasificar de acuerdo al modelo

matemático asociado a cada tipo de experimento. Si durante el experimento se mide el flujo de humedad a través del sólido, el modelo se basará en la primera ley de Fick. Si, por el contrario, en el experimento se cuantifica la difusión de humedad hacia el interior del sólido o desde este hacia el exterior, el modelo se basará en la segunda ley de Fick.

Cuando el coeficiente de difusión del material sólido tiene dependencia con la propia concentración de humedad los modelos matemáticos que describen la dinámica de humedad suelen ser de tipo no lineal. Por ello, otro criterio para clasificar el método de estimación del coeficiente de difusión, es el método usado en la resolución del modelo matemático. En algunos casos la solución se obtiene de forma analítica, con el uso de una aproximación de la ecuación de difusión y en otros, la solución se obtiene mediante algún método numérico como las diferencias finitas o los elementos finitos.

En la Figura 3.1 se ilustran algunos criterios mediante los cuales clasificar los métodos experimentales usados en la estimación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos. En los apartados siguientes se hace una breve descripción de los mismos.

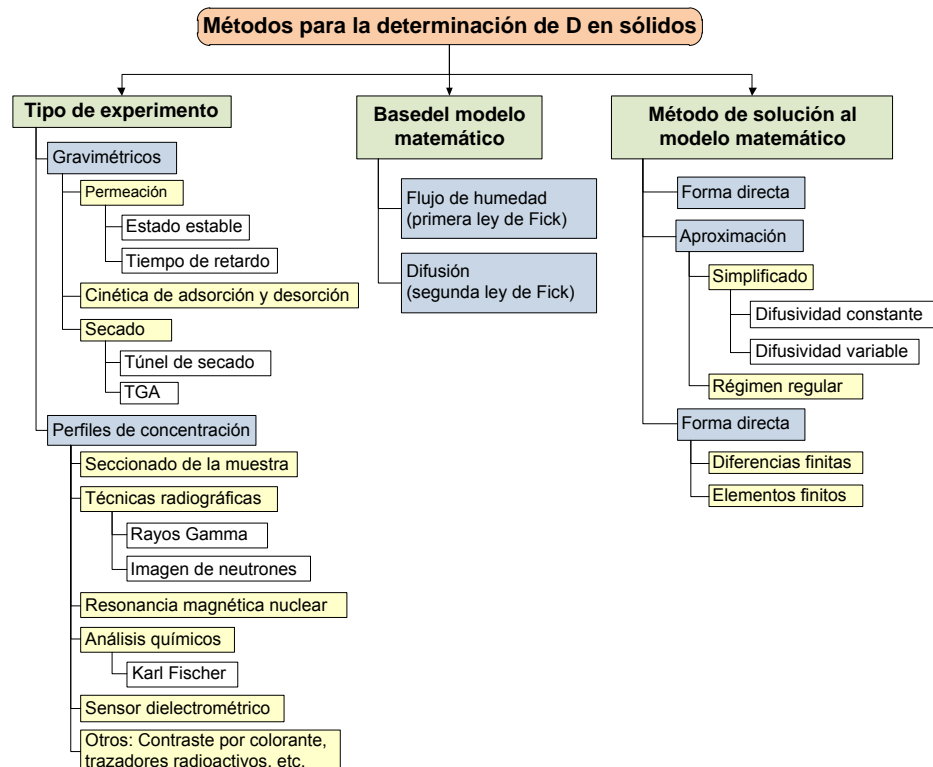


Figura 3.1 Clasificación de los métodos experimentales para la estimación del coeficiente de difusión en sólidos.

3.2 Descripción de los tipos de experimentos

3.2.1 Experimentos gravimétricos

Los experimentos gravimétricos son aquellos que relacionan la variación de masa con alguna de las variables asociadas a la dinámica de humedad del ensayo, como por ejemplo el flujo de agua a través del material o la adsorción o desorción de humedad en la muestra del sólido. A continuación se describen los distintos tipos de experimentos gravimétricos.

Experimentos gravimétricos de permeación

El método de permeación, también conocido como método de copa de difusión o copa húmeda, fue inicialmente desarrollado para la evaluación de coeficientes de difusión en membranas de polímeros [21]. Este método consiste en someter a una membrana del material bajo estudio a diferentes concentraciones de humedad en cada una de sus caras y cuantificar, mediante medición de peso, la cantidad de agua que pasa de una cara a otra. La Figura 3.2 muestra los elementos de un experimento de permeación para la determinación del coeficiente de difusión.

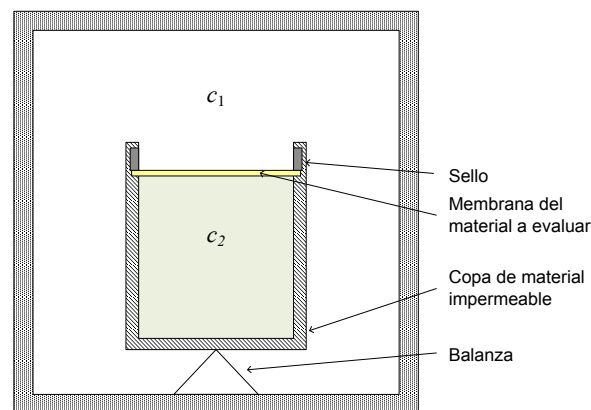


Figura 3.2 Esquema de los experimentos de permeación

El experimento de permeación puede realizarse de dos formas [127]. La primera de ellas se denomina “*Método de Régimen Permanente*” y consiste en mantener las humedades relativas de las dos caras del material bajo estudio en valores constantes y conocidos. Esto se puede conseguir empleando soluciones salinas reguladoras. Después de un tiempo, ambas superficies del material bajo evaluación alcanzan el equilibrio con la atmósfera a la que están expuestas y se obtiene un gradiente de concentración superficial constante. Aplicando la primera ley de Fick y admitiendo

una variación lineal de la humedad en el material, este estado puede expresarse, en el caso de una hoja plana de espesor l , como:

$$F = D \cdot \frac{c_1 - c_2}{l} \quad 3.1$$

donde:

- F : Flujo de humedad ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)
 c_1, c_2 : Concentraciones de equilibrio en las superficies del material a evaluar (kg m^{-3})
 D : Coeficiente de difusión de humedad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

En este caso el flujo de humedad, o de cualquier otra sustancia a través del sólido, se obtiene mediante el registro de la masa de la copa a intervalos de tiempo determinados. Las concentraciones de equilibrio se obtienen a partir de las curvas de equilibrio de sorción isotérmica del material bajo evaluación, como por ejemplo curvas de tipo BET, GAB, Langmuir o cualquier otra. En la referencia [109], puede encontrarse una explicación detallada sobre los diferentes tipos de curvas de sorción isotérmica.

El segundo método para realizar el experimento de permeación se denomina tiempo de retardo (*time lag*), y se basa en determinar la evolución del flujo de humedad en el espécimen (Figura 3.3) durante el transitorio, y el tiempo preciso para alcanzar un régimen permanente del proceso de difusión. Para ello es necesario que la superficie externa del material bajo evaluación sea sometida a una atmósfera con una concentración de humedad nula ($c_1 = 0$), mientras la cara interna queda sometida a una atmósfera que permita una concentración de equilibrio constante ($c_2 = c$). Si inicialmente la hoja del material a evaluar está exenta de humedad, y la humedad que llega a la cara externa es retirada constantemente, tras un periodo de tiempo muy largo ($t \rightarrow \infty$), se alcanza una condición de difusión de régimen permanente. Una vez alcanzado el régimen permanente, la cantidad de humedad que permea la membrana en un tiempo t , se puede aproximar mediante la ecuación de una recta [20].

$$Q = \frac{D \cdot c}{l} \cdot \left(t - \frac{l^2}{6 \cdot D} \right) \quad 3.2$$

donde:

Q : Es la cantidad de agua por unidad de área, que permea el material (kg m^{-2})

t : tiempo (s)

Dividiendo la ecuación 3.2 por el término constante ($l \cdot c$), obtenemos la ecuación 3.3.

$$\frac{Q}{l \cdot c} = \frac{D}{l^2} \cdot t - \frac{1}{6} \quad 3.3$$

A partir de la ecuación 3.3, se deduce que la recta de la curva aproximada corta al eje de tiempo en un valor igual a $(l^2/6D)$. Como se muestra en la Figura 3.3, al encontrar de manera gráfica el punto de intersección de la recta con el eje del tiempo, se puede calcular el valor del coeficiente de difusión.

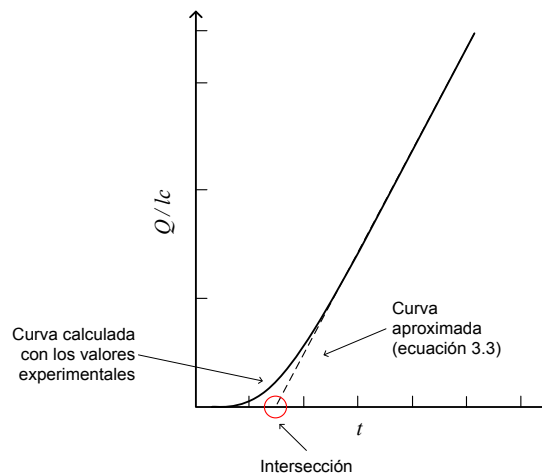


Figura 3.3 Gráfica empleada para la determinación del coeficiente de difusión por el método de tiempo de retardo, adaptado de [20].

Aunque los principios conceptuales de los experimentos de permeación son simples, e incluso pueden aplicarse a materiales cuyo coeficiente de difusión depende de la concentración de humedad, su aplicación presenta varios problemas desde el punto de vista experimental [127], como son el asegurar una hoja de material lo suficientemente delgada y de espesor constante, lograr un adecuado sello en los extremos de la hoja para asegurar que todo el flujo de humedad se realiza a través del área de la membrana, evitar mediciones erróneas del flujo por la formación de masas de agua estancadas en las superficies del material, evitar cambios de espesor de la membrana por el hinchamiento, lograr mantener constantes las humedades relativas en cada cara de la membrana. Además, para aplicar estos

métodos es necesario disponer de curvas de equilibrio con las que sea posible determinar las concentraciones de equilibrio a partir de conocer el valor de la humedad relativa y la temperatura de la muestra durante el experimento.

Las referencias [3, 9, 41, 42, 43, 53, 98, 108], son algunos trabajos que emplean métodos de permeación en la estimación del coeficiente de difusión de humedad en distintos materiales sólidos como papeles, cartones, yeso y asfalto.

Experimentos gravimétricos de cinética de adsorción o desorción

Este tipo de experimento consiste en someter una muestra del material bajo evaluación, a una atmosfera en la que se mantengan unas condiciones de humedad relativa y temperatura constantes. La variación de la masa de la muestra debe ser registrada a intervalos de tiempo específicos hasta que se alcance el equilibrio.

Este método requiere plantear un modelo matemático que relacione la evolución en el tiempo de la masa de la muestra, con el valor de la masa cuando la muestra alcanza el equilibrio. A partir de los valores experimentales y el modelo matemático es posible obtener el valor del coeficiente de difusión de humedad en el material bajo estudio. Por ejemplo, como se expondrá posteriormente en el apartado 3.4.2, la ecuación 3.4 [20, 127], representa la tasa de adsorción de humedad de una placa infinita de espesor l , este modelo puede emplearse para estimar el coeficiente de difusión de una hoja de material seco, sometida a un proceso de adsorción de humedad.

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot e^{\left[- \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D \cdot t}{l^2} \right]} \quad 3.4$$

donde:

- M_t : Masa de la muestra en el tiempo t
- M_∞ : Masa de la muestra en el equilibrio
- n : Enésimo término de la sumatoria
- D : Coeficiente de difusión

Este tipo de experimento [127], presenta varias dificultades en su implementación como es la determinación de la medida del peso de la muestra con suficiente precisión y resolución, en especial cuando la cantidad de humedad adsorbida es

reducida. Además, en ocasiones, se pueden formar capas de agua sobre la superficie del espécimen bajo evaluación afectando la salida de humedad desde el interior.

En las referencias [21, 99], se emplea el método de cinética de adsorción o desorción, en la estimación del coeficiente de difusión de humedad en polímeros derivados de celulosa.

Experimentos gravimétricos de secado

Este tipo de experimentos consisten en someter a la muestra del material previamente humedecida, a una atmosfera con temperatura y humedad relativa controlada, de modo que la muestra de material se seque durante el ensayo.

Los experimentos gravimétricos de secado, son los más empleados para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en materiales sólidos, ya que sus resultados pueden usarse en la optimización de los procesos de secado industrial [126, 127].

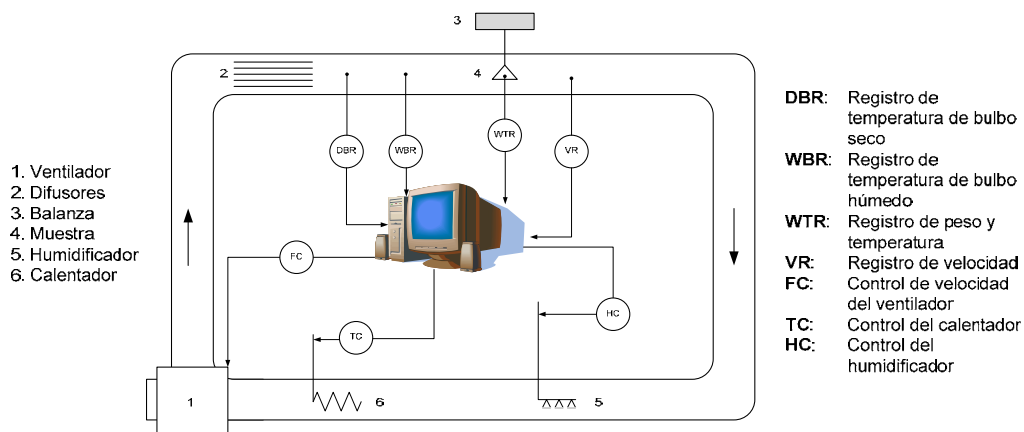


Figura 3.4 Túnel de secado empleado en la estimación del coeficiente de difusión de humedad, tomado de [127].

Durante el proceso de secado se registra la variación de peso de la muestra a intervalos de tiempo preestablecidos, con lo cual se determina su pérdida de masa. La Figura 3.4 muestra el esquema de un túnel de secado usado en la determinación del coeficiente de difusión de humedad. Ejemplos del uso de este tipo de experimento, son los trabajos de Kechaou [60] y Zogzas [127], que describen estudios sobre determinación del coeficiente de difusión en diferentes alimentos como dátiles, patatas, manzanas y zanahorias.

En el caso de muestras de menor tamaño, en lugar del túnel de secado, se emplean los analizadores termogravimétricos o TGA (Thermo Gravimetric Analyzer).

Durante las mediciones en el TGA se registra continuamente, y con gran precisión, la pérdida de masa de una muestra, sometida a una temperatura controlada. Además, este tipo de analizador permite emplear una atmósfera inerte como nitrógeno (N_2).

El empleo de analizadores TGA permite obtener de manera rápida y precisa la curva de secado de la muestra (concentración promedio de humedad en función del tiempo).

A partir de la curva de secado es posible inferir algunos otros parámetros de la dinámica de humedad tales como la humedad crítica, la humedad de equilibrio, caracterizar la etapa de secado a velocidad constante y determinar el coeficiente de difusión entre otros [70].

El uso de una atmósfera inerte durante los ensayos en el TGA tiene las siguientes ventajas:

- Minimiza la probabilidad de que los materiales bajo prueba se degraden por oxidación o por combustión.
- Asegura una atmósfera libre de humedad ($HR=0\%$).
- Permite una rápida evaporación de la humedad superficial de la muestra, haciendo que la difusión sea el mecanismo de transporte predominante durante el secado. Esto se logra ajustando una adecuada tasa de flujo del gas.

El análisis termogravimétrico, ha sido empleado en la determinación del coeficiente de difusión de humedad en diversos materiales como alimentos, yeso, sílica gel y residuos vegetales [13, 70, 89].

Los experimentos de túnel de secado y los de TGA, presentan la ventaja de ser fáciles de implementar, además de ser precisos y ofrecer alta repetibilidad. Sin embargo presentan la limitación de que reflejan el comportamiento global del proceso de desorción de humedad de la muestra bajo estudio (concentración de humedad media), no siendo posible conocer la evolución de la concentración local de humedad en el interior del material durante el secado. Dado que el fenómeno de difusión de humedad depende de la concentración local de humedad en el interior de la muestra, este hecho hace necesario incluir ciertas consideraciones en el planteamiento del modelo matemático y en el método de resolución del mismo.

Como se detallará en el Capítulo 4, en este trabajo de tesis se ha implementado un experimento gravimétrico de secado, para la estimación del coeficiente de

difusión de papeles aislantes no impregnados de aceite, empleando un analizador termogravimétrico.

3.2.2 Experimentos basados en los perfiles de concentración de humedad

Este tipo de experimentos para la obtención del coeficiente de difusión de humedad son conocidos también como *curvas de concentración-distancia* [20, 127] y se usan fundamentalmente en los casos en los que ocurre difusión de tipo unidireccional, tal como sucede con la difusión de humedad en los aislamientos de los transformadores de potencia [2].

Los experimentos consisten en determinar el perfil de concentración de humedad de la muestra del material bajo estudio en distintos instantes, bien sea durante un proceso de adsorción o de desorción. La ventaja de este tipo de experimentos radica en que al aplicarlos en aquellos materiales en los que existe dependencia del coeficiente de difusión con la concentración de humedad, esta dependencia se puede evaluar de forma simple a través de los perfiles de concentración. Sin embargo en la mayor parte de los casos, la obtención de estos perfiles resulta complicada, poco precisa o bien requiere disponer de equipos de medida sofisticados.

Los experimentos basados en la determinación de los perfiles de concentración de humedad pueden subdividirse de acuerdo a la técnica empleada para su determinación. A continuación se describen algunas de las técnicas empleadas para la determinación de los perfiles de concentración de humedad o curvas de concentración-distancia reportados en la literatura.

Determinación del perfil de concentración de humedad mediante seccionado de la muestra

Esta técnica consiste en someter una muestra de material seco a un proceso de humectación, o una muestra previamente humedecida a un proceso de secado, en cualquiera de los dos casos, asegurando difusión en una sola dirección.

La Figura 3.5 muestra el esquema de un experimento en el que la difusión de humedad en una muestra de material seco se realiza de forma unidireccional. Después de un tiempo, el material es seccionado en la dirección de la difusión de

humedad y posteriormente, determinando el contenido de humedad de cada sección, se estima el perfil de concentración de humedad.

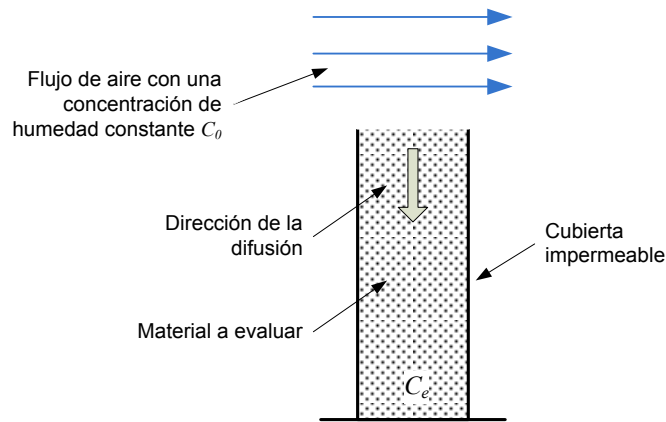


Figura 3.5 Esquema de un experimento para la determinación del perfil de concentración de humedad. Adaptado de [127]

Ejemplos de la aplicación de esta técnica se pueden encontrar en los trabajos presentados por Johnson [57].y Hukka [49], para la determinación de coeficientes de difusión en plátano y madera respectivamente.

Una variante de esta técnica consiste en unir dentro de una cubierta impermeable dos cilindros de muestra del material iguales. Uno de los cilindros está saturado de humedad y el otro seco, de tal forma que al unirlos, la humedad se difunde desde el cilindro húmedo al seco. Después de un tiempo, se determina el perfil de concentración de humedad a lo largo del eje de los dos cilindros, mediante seccionando y pesado de las muestras. Para este tipo de experimento, Crank [20], define un modelo matemático en el que, mediante evaluación numérica o gráfica del perfil de concentración de humedad resultante, es posible determinar de forma directa el coeficiente de difusión de humedad.

Determinación del perfil de concentración de humedad mediante técnicas radiográficas

En este tipo de técnicas la muestra del material bajo evaluación se expone a radiación de alta energía. Un porcentaje de la radiación incidente en el material es absorbida y la restante pasa a través de él. La parte de la radiación que logra pasar a través del material se emplea para generar una imagen, usualmente en forma de escala de grises, cuya intensidad refleja la cantidad de radiación que logró atravesar el material.

La cantidad de radiación que pasa a través del material así como la cantidad absorbida dependen de la naturaleza de la radiación, de su potencia y de ciertas características del material evaluado como son por ejemplo la densidad, el espesor o el contenido de humedad. De este modo, analizando la cantidad de radiación que pasa a través de un material se puede determinar su perfil de concentración de humedad.

Las técnicas radiográficas más usadas para la determinación de los perfiles de concentración de humedad son los rayos Gamma y la imagen de neutrones (NI por sus siglas en inglés). Ejemplos del uso de estas técnicas son los trabajos sobre determinación de coeficientes de difusión de humedad en materiales de construcción [87, 90], y en madera [107].

Determinación del perfil de concentración de humedad mediante Resonancia Magnética Nuclear (NMR)

La Resonancia Magnética Nuclear (NMR por sus siglas en inglés), es una técnica que ha sido ampliamente usada en el campo médico y consiste en excitar los protones y neutrones que componen el núcleo atómico de ciertos elementos, mediante un campo magnético, para así determinar los estados de su momento magnético.

Según se documenta en [91], para la determinación de los perfiles de concentración de humedad en materiales sólidos, se deben excitar los momentos magnéticos de los núcleos de hidrogeno, escogiendo una frecuencia adecuada del campo magnético aplicado al material. De esta manera se obtiene la denominada señal eco del espín del material. La amplitud de esta señal eco, es proporcional al número de núcleos excitados por el campo magnético aplicado. La condición de resonancia para el núcleo de hidrógeno viene dada por:

$$f = \gamma \cdot B_0 \quad 3.5$$

donde:

f : Frecuencia del campo (MHz)

B_0 : Campo magnético externo (T)

γ : Relación giro-magnética, para el hidrógeno $\gamma = 42,58 \text{ (MHz T}^{-1}\text{)}$

Como se deduce de la ecuación 3.5, aplicando unos adecuados valores del campo magnético (magnitud y frecuencia), el método puede hacerse sensible al hidrógeno del material y por tanto al contenido de agua, lo que permite emplearlo en la determinación de los perfiles de concentración de humedad. Esta técnica ha sido usada en la determinación del coeficiente de difusión en papel [68], y también en materiales de construcción como ladrillo cocido, yeso y arenisca [91].

Determinación del perfil de concentración de humedad mediante análisis químico

Dentro de esta categoría de experimentos, el más empleado es el método conocido como valoración de Karl Fischer. Este método de valoración de química analítica permite la determinación del contenido de humedad en sólidos, líquidos y gases. La valoración de humedad mediante el método Karl Fischer puede ser de tipo coulométrica o volumétrica. La valoración coulométrica se basa en determinar la cantidad de carga eléctrica requerida durante la reacción entre la humedad que se está cuantificando y la sustancia de valoración. En la valoración volumétrica se mide la cantidad de sustancia de valoración requerida para la reacción química con la humedad que se está cuantificando.

En el caso de sólidos como los aislamientos celulósicos, la muestra de material bajo evaluación es calentada en un horno. Los gases evaporados de la muestra (incluido el vapor de agua), son conducidos al recipiente de valoración [115]. El recipiente de valoración coulométrica, suele estar constituido como una celda de electrólisis con dos compartimentos conectados por un diafragma poroso como el mostrado en la Figura 3.6.

Para la determinación de los perfiles de concentración de humedad mediante el método de valoración de Karl Fischer, es necesario extraer y cuantificar la humedad de la muestra del material a diferentes profundidades del espesor, durante un proceso de secado o humectación. Este procedimiento fue empleado por Asem [4] para determinar perfiles de humedad sobre cartones prensados y papeles aislantes de transformador.

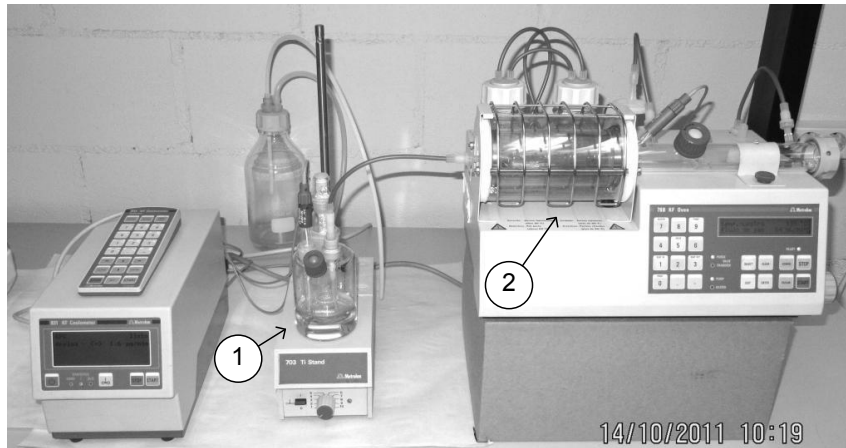


Figura 3.6 Equipo para valoración culométrica de Karl Fischer, 1- recipiente de valoración, 2- horno para la extracción de humedad de sólidos.

El método de Karl Fischer tiene la ventaja de ser selectivo respecto a la cuantificación de humedad, ya que la reacción sólo se produce con el agua y no con otras sustancias. Además presenta una buena precisión en la valoración de la humedad en muestras de pequeño tamaño. Sin embargo, durante la obtención de perfiles de humedad por este método, se debe tener precaución con los errores acumulados durante la manipulación de las muestras, ya que estos pueden afectar significativamente los resultados.

Determinación del perfil de concentración de humedad por medio de un sensor dielectrométrico

Los sensores dielectrométricos se basan en inferir los cambios en las propiedades de los materiales, a partir de medidas eléctricas sobre los mismos. Este tipo de sensores se han empleado ampliamente en la caracterización de diversas propiedades de los materiales debido a que las pruebas realizadas con ellos son de tipo no destructivo [76].

Mamishev [75], desarrolló un sensor denominado *sensor dielectrométrico interdigital de múltiple frecuencia*, para monitorizar la humedad en aislamientos sólidos de transformador, el cual posteriormente fue mejorado por Du [26]. Este sensor mide la permitividad compleja en función del espesor de una muestra de material, y dado que esta propiedad cambia con el contenido de humedad, es posible inferir el perfil de concentración de humedad.

La ventaja del uso de este tipo de sensores es que se puede obtener de manera rápida el perfil de concentración de humedad en el espécimen bajo ensayo. Sin embargo, este tipo de sensor requiere un ajuste previo para cada tipo de material, a fin de poder relacionar los cambios en la permitividad compleja con el contenido de humedad, lo que no resulta sencillo.

3.3 Base del modelo matemático

Para obtener el valor del coeficiente de difusión de humedad a partir de los valores experimentales, se debe emplear un modelo matemático. Dicho modelo matemático debe representar la física del experimento.

Considerando el transporte de humedad hacia el interior o hacia el exterior del sólido como un proceso de difusión, se distinguen dos tipos de modelos matemáticos: aquellos que se basan en cuantificar el flujo de la sustancia que pasa a través del material y aquellos que cuantifican la variación temporal de la cantidad de sustancia dentro del propio material como función del gradiente espacial de concentración.

En el primer caso los modelos se basan en la aplicación de la primera ley de Fick (ecuación 3.6), y en el segundo caso se basan en aplicar la segunda ley de Fick (ecuación 3.7).

$$F = -D \cdot \nabla c \quad 3.6$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 c \quad 3.7$$

donde:

F : Flujo de sustancia

D : Coeficiente de difusión o difusividad

c : Concentración local de humedad

Como se mostró anteriormente, los modelos basados en la primera ley de Fick, son empleados cuando se realizan experimentos de permeación, mientras que en los restantes tipos de experimentos se emplean modelos basados en la segunda ley de Fick.

El modelo matemático usado en cada caso debe ajustarse a las particularidades del experimento representado su geometría y considerando además unas adecuadas condiciones iniciales y de frontera.

3.4 Métodos de solución al modelo matemático

Otro de los criterios para clasificar los métodos experimentales para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en sólidos, es la manera en que se resuelve el modelo matemático que representa el experimento. A continuación se describen los diferentes métodos que se pueden emplear.

3.4.1 Solución directa

Este tipo de solución se aplica en el caso de los experimentos de permeación. En este caso, el modelo que representa el experimento se basa en la primera ley de Fick. Una vez definidas la geometría y las condiciones de frontera, es posible obtener una ecuación analítica o una gráfica que relacione directamente el valor del coeficiente de difusión con los datos experimentales. Las ecuaciones 3.1 y 3.2 son ejemplos de este tipo de solución. Crank en [20] y Crank y Park en [21], presentan, además de estas ecuaciones, otras similares para geometrías esféricas y cilíndricas e incluso para casos de coeficiente de difusión variables.

3.4.2 Aproximación analítica a la ecuación de difusión

Los modelos matemáticos basados en la segunda ley de Fick, no pueden ser resueltos de manera directa, puesto que incluyen una ecuación diferencial de segundo orden, que además se convierte en no lineal cuando el coeficiente de difusión es dependiente de la concentración.

Ante este problema, Crank [20] presenta una serie de ecuaciones analíticas que permiten una aproximación de la solución a la segunda ley de Fick. Estas ecuaciones han sido derivadas para unas condiciones de frontera particulares y para las geometrías más comunes como placas, esferas y cilindros. La ecuación 3.8 muestra la ecuación analítica propuesta por Crank, para el modelado del secado de una muestra con geometría de placa plana y difusión en sentido transversal al espesor de la misma.

$$X^o = \frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2 \cdot n + 1^2} \cdot e^{\left[\frac{-D \cdot (2 \cdot n + 1)^2 \pi^2 \cdot t}{l^2} \right]} \quad 3.8$$

donde:

- X^o : Relación adimensional de humedad
- M_t : Masa de agua que se ha extraído de la muestra en el tiempo t
- M_∞ : Masa de agua que se ha extraído de la muestra cuando se alcanza el régimen permanente ($t \rightarrow \infty$)
- l : Espesor de la placa
- t : Tiempo

La relación adimensional de humedad representa la variación del contenido de humedad en la muestra en función del contenido total de agua de la misma.

El valor del coeficiente de difusión se puede obtener mediante el ajuste de los valores de la ecuación analítica a los valores experimentales de la relación adimensional de humedad (X^o). También se podría obtener de manera gráfica dibujando los valores de la relación adimensional de humedad frente al tiempo, en una escala semilogarítmica. El valor del coeficiente se puede extraer determinando la pendiente de los valores en el primer periodo de decaimiento del secado (periodo de secado de velocidad constante), que corresponde a la constante de tiempo del primer sumando de la serie infinita ($\pi^2 D/l^2$).

El uso de una aproximación analítica de este tipo se denomina método simplificado para difusividad constante [127], y como indica su nombre solo es útil en el caso de materiales con coeficientes de difusión independientes de la concentración de humedad.

La solución de la ecuación de difusión mediante ecuaciones analíticas, como las series infinitas, presenta varias dificultades en su aplicación a problemas prácticos [20]. En primer lugar, la evaluación numérica de la solución no es trivial. Por otra parte los métodos y soluciones analíticas, en la mayoría de los casos, se restringen a geometrías simples y a coeficientes de difusión constantes. En otras palabras, este tipo de solución se puede aplicar únicamente a formas lineales de las ecuaciones de difusión y de las condiciones de frontera. Esto representa una limitación severa

cuando el coeficiente de difusión tiene una marcada dependencia con la concentración.

Para materiales con coeficientes de difusión dependientes de la concentración de humedad, Perry [92] propuso un método alternativo denominado *método simplificado para difusividad variable*. Este método consiste en evaluar la relación adimensional de humedad teórica, para diferentes valores del número de Fourier, que en el caso de una muestra con geometría de placa se define como:

$$F_o = \frac{D \cdot t}{l^2} \quad 3.9$$

donde:

- F_o : Número de Fourier
- D : Coeficiente de difusión
- l : Espesor de la placa
- t : Tiempo

Posteriormente, en un diagrama semilogaritmico, se dibujan los valores teóricos y experimentales de X^0 en función del tiempo y del número de Fourier (Figura 3.7).

Luego, por comparación de las pendientes de las curvas experimental y teórica, se obtiene el valor del coeficiente de difusión, para un valor específico de la relación adimensional de humedad (X_i^0), lo cual se puede realizar con ayuda de la ecuación 3.10.

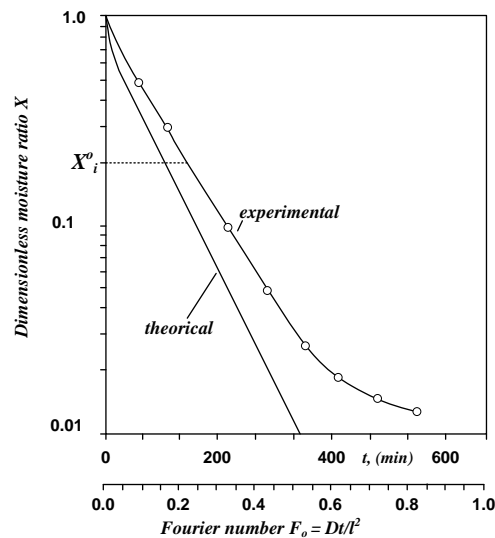


Figura 3.7 Ejemplo de evaluación del método simplificado, para difusividad variable, tomado de [127].

Dado que el valor de la relación adimensional de humedad (X_i^0), tiene correspondencia directa con el valor de concentración de humedad, es posible encontrar la dependencia del coeficiente de difusión de humedad, aplicando la ecuación 3.10 a todo el rango de variación de X^0 .

$$D_i = \frac{\left[\left(\frac{dX^0}{dt} \right)_{\text{exp}} \right]}{\left[\left(\frac{dX^0}{dt} \right)_{\text{the}} \right]} \cdot l^2 \quad 3.10$$

3.4.3 Método de régimen regular (RR)

El método de régimen regular fue propuesto por Schoeber en 1976 [105], y su idea básica es que al inicio de un secado únicamente emana del material la humedad cercana a la superficie, y por tanto el proceso puede ser considerado como difusión en un medio semi-infinito.

Una vez que finaliza este primer periodo, se inicia el denominado *régimen regular* (RR), en el que el coeficiente de difusión de humedad en función de la concentración se comporta de manera monótonamente decreciente [123]. Schoeber, observó que durante el régimen regular, la tasa de desorción de humedad es independiente del valor de concentración inicial lo cual supone una importante ventaja.

El procedimiento propuesto por Schoeber requiere, en primer lugar, determinar la tasa de secado isotérmico, es decir el flujo de humedad desde el material (F). Este parámetro se puede obtener por diferenciación numérica o gráfica de la evolución en el tiempo de la concentración de humedad, durante un experimento de secado.

Luego, relacionando el flujo de humedad con parámetros asociados con la geometría de la muestra, se obtiene un valor adimensional del flujo de humedad (F_p)¹.

Posteriormente se dibuja la curva $\ln F_p$, frente a $\ln C_m$, a partir de la cual, por diferenciación numérica o gráfica, se puede determinar el gradiente:

$$\frac{d(\ln F_p)}{d(\ln C_m)} \quad 3.11$$

¹ Schoeber plantea ecuaciones para placas, cilindros y esferas

A continuación, para las diferentes geometrías analizadas, se correlaciona este gradiente con el número de Sherwood² que de forma general obedece a la ecuación 3.12.

$$S_h = \frac{K \cdot L}{D} \quad 3.12$$

donde:

- K : Coeficiente de transferencia de masa
- D : Coeficiente de difusión
- L : Longitud característica

Finalmente el coeficiente de difusión se relaciona con el número de Sherwood de acuerdo a la ecuación 3.13.

$$\int_0^{C_m} D \cdot \rho_s^2 \cdot dC_m = \frac{2 \cdot F \rho}{S_h} \quad 3.13$$

donde ρ_s es la concentración de masa de la muestra.

Dibujando el término de la parte derecha de la ecuación 3.13, en función de la concentración media de humedad, es posible, mediante diferenciación numérica o gráfica, obtener el valor del coeficiente de difusión y su dependencia con la concentración de humedad.

Según Zogzas [127], el método de régimen regular, puede incorporar un mayor error en la determinación del coeficiente de difusión de humedad, puesto que requiere sucesivas diferenciaciones e interpolaciones de los datos experimentales. Además Yamamoto [123] indica, que la aplicación del método RR también es difícil de llevar a cabo cuando se cuenta con datos experimentales dispersos.

3.4.4 Métodos numéricos

La resolución de la ecuación de difusión, puede realizarse mediante técnicas numéricas, siendo las más empleadas la de las diferencias finitas (MDF), y el método de los elementos finitos (MEF). La aplicación de estas técnicas de forma manual es

² Schoeber dedujo el número de Sherwood para las diferentes geometrías analizadas y teniendo en cuenta además si el coeficiente de difusión tiene o no dependencia con la concentración de humedad. Los valores del número de Sherwood son mostrados por Schoeber de forma tabulada y mediante gráficas.

usualmente difícil debido a que la solución de los métodos numéricos se debe hacer de manera iterativa. Este hecho limitó su uso en las primeras épocas de su desarrollo. Sin embargo, en los últimos años, debido al constante incremento de la capacidad computacional de los ordenadores, se han convertido en métodos de gran popularidad para la resolución de diversos problemas en las áreas de la ingeniería y de la física.

Si bien los principios matemáticos del MDF y el del MEF son diferentes, en ambos casos, para aplicar estos métodos numéricos se requiere subdividir el dominio del modelo (discretización). Si cada una de estas subdivisiones, conocidas como elementos, son lo suficientemente pequeñas, los fenómenos físicos representados mediante ecuaciones diferenciales pueden ser replanteados para ser analizados mediante ecuaciones algebraicas lineales. Con estas ecuaciones algebraicas y las adecuadas condiciones iniciales y de frontera, es posible obtener una solución exacta del fenómeno físico en algunos puntos del dominio bajo estudio (nodos). En los sitios intermedios a estos puntos la solución se estima por interpolación. Este es el motivo por el que estos métodos se consideran aproximados.

Dado que los métodos numéricos son una solución aproximada, en ocasiones, cuando se emplean para la estimación de los valores del coeficiente de difusión, es necesario realizar un análisis estadístico complementario [127].

Método de las diferencias finitas (MDF)

La forma de aproximar las derivadas en el método de las diferencias finitas, se ilustra mediante la función mostrada en la Figura 3.8.

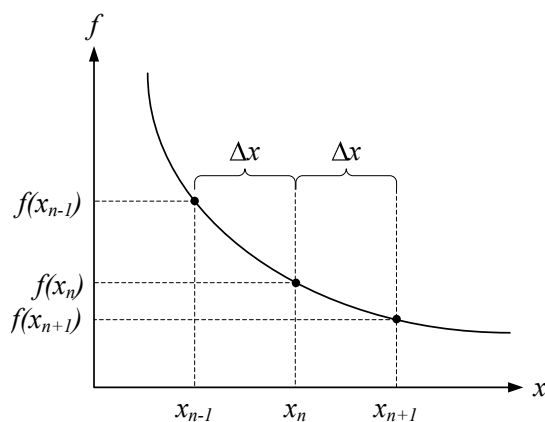


Figura 3.8 Gráfica para explicar la aproximación de las derivadas de una función por el método de diferencias finitas.

El valor $f(x = x_{n+1})$, puede aproximarse usando los primeros tres términos de la serie de Taylor como:

$$f(x_{n+1}) = f(x_n) + \Delta x \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_n} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x_n + \theta \cdot \Delta x} \quad 3.14$$

donde:

θ : Un número comprendido entre 0 y 1

Δx : Espaciado de x

Despejando la primera derivada de $f'(x = x_n)$, de la ecuación 3.14 obtenemos:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_n} = \frac{f(x_{n+1}) - f(x_n)}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x_n + \theta \cdot \Delta x} \quad 3.15$$

Despreciando el término correspondiente a la segunda derivada, obtenemos la aproximación de la derivada de la función, mediante la denominada diferencia finita hacia adelante:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_n} \approx \frac{f(x_{n+1}) - f(x_n)}{\Delta x} \quad 3.16$$

El error en esta aproximación es el término que se ha despreciado anteriormente, el cual es proporcional a Δx y viene dado por la ecuación 3.17.

$$E = -\frac{\Delta x}{2} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x_n + \theta \cdot \Delta x} \quad 3.17$$

Empleando de nuevo la serie de Taylor para encontrar el valor de la función $f(x = x_{n-1})$, podemos aproximar la derivada $f'(x = x_n)$ mediante la denominada diferencia finita hacia atrás, donde de nuevo el error es proporcional a Δx .

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_n} \approx \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{\Delta x} \quad 3.18$$

Usando un procedimiento similar, para aproximar los valores de $f(x = x_{n+1})$ y $f(x = x_{n-1})$ mediante los primeros cuatro términos de la serie de Taylor, y realizando la diferencia entre ellos, se puede obtener una expresión para la derivada $f'(x = x_n)$, conocida como diferencia finita central (ecuación 3.19). El error en este caso es

proporcional a $(\Delta x)^2$, por lo cual es una mejor aproximación que las de las diferencias finitas hacia adelante o hacia atrás.

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_n} \approx \frac{f(x_{n+1}) - f(x_{n-1}))}{2\Delta x} \quad 3.19$$

De forma similar, utilizando el método de las diferencias finitas, la segunda derivada de la función $f''(x=x_n)$ puede aproximarse mediante la ecuación 3.20, con un error proporcional a $(\Delta x)^2$.

$$\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x_n} \approx \frac{f(x_{n+1}) - 2f(x_n) + f(x_{n-1}))}{(\Delta x)^2} \quad 3.20$$

Usando el método de las diferencias finitas es posible encontrar los valores aproximados de las primeras y segundas derivadas de una función, en cada punto o nodo en que se ha discretizado el dominio, dando como resultado un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas. Para resolver este sistema de ecuaciones se requiere estimar los valores de la función en los nodos contiguos, lo cual se logra mediante un proceso iterativo, partiendo de unas condiciones iniciales y de frontera conocidas.

Se han desarrollado diferentes metodologías, basadas en el principio matemático de las diferencias finitas, para dar solución a los modelos matemáticos de difusión de humedad. Las principales son recopiladas y explicadas en detalle por Crank en [20]. En las referencias [4, 11, 47, 70-73, 80], se pueden encontrar algunos ejemplos del uso del MDF en la solución de modelos matemáticos que involucran difusión en sólidos.

Método de los elementos finitos (MEF)

El método de los elementos finitos (MEF), es una técnica general para encontrar soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales e integrales cuyas bases teóricas se plantearon en la década de 1940. Hoy en día, existen aplicaciones del método de los elementos finitos en todas las áreas de la ingeniería y de la física. Las referencias [1, 3, 24, 83, 84, 118], presentan ejemplos de la utilización del MEF en la solución de modelos matemáticos relacionados con fenómenos de difusión.

El proceso de discretización del MEF, es diferente del empleado en el método de diferencias finita [56], ya que en este caso se reformula el problema dado por

ecuaciones diferenciales como un problema de tipo variacional. En él las ecuaciones se escriben en forma integral, de manera que resulten ecuaciones tratables mediante los métodos del álgebra lineal, sobre un espacio vectorial de dimensión infinita llamado espacio funcional.

La ventaja del método de los elementos finitos respecto del de diferencias finitas, es que con éste es posible abordar de manera más fácil problemas con geometría complicada, condiciones de frontera generales y también condiciones y propiedades no lineales de los materiales. Estas cualidades han repercutido en el desarrollo de un gran número de herramientas comerciales de simulación tanto de propósito general como específico basadas en el MEF.

Para llevar a cabo un cálculo mediante el MEF se requiere realizar las siguientes tareas:

- Pre-proceso: consiste en la definición de la geometría, discretización del dominio, asignación de las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones se realizan operaciones de regularización de la malla y pre-acondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- Cálculo: el resultado del pre-proceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo, a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- Post-proceso: el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización. En el post-proceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

3.5 Métodos empleados por otros autores en la determinación del coeficiente de difusión en aislamientos celulósicos

Como se mostró en el capítulo 2, en la literatura técnica se encuentran distintos valores del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos sólidos de tipo celulósico para transformador. Estos coeficientes han sido estimados por los diversos autores siguiendo métodos experimentales diferentes, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a los criterios mostrados en la Figura 3.1. A continuación se describen algunos de los métodos reportados en la literatura, con los cuales se obtuvieron valores para el coeficiente de difusión de aislamientos celulósicos. Finalmente se presenta su clasificación de acuerdo a los criterios indicados en este trabajo de tesis.

3.5.1 Método empleado por Ast

En 1966 Ast³ [6, 26], realizó pruebas para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en papel Kraft tipo A50P281A. El método experimental empleado fue el de permeación. Para la obtención del coeficiente de difusión se usó un modelo basado en la primera ley de Fick.

El experimento consistió en exponer una de las caras de una hoja de papel a una humedad relativa de 0%, mientras que la otra superficie fue expuesta a una humedad relativa conocida. Para conseguir un ambiente con humedad relativa del 0% Ast empleó un sulfato de calcio anhidro (Drierite®), y para crear una atmósfera con humedad relativa controlada empleó el vapor de una solución salina reguladora.

La tasa de migración de humedad desde la cara húmeda hacia la cara seca de la hoja de papel fue determinada midiendo de manera periódica la pérdida de masa del contenedor de la solución reguladora.

El experimento se realizó para dos espesores diferentes y distintas temperaturas.

El modelo matemático usado por Ast se basó en la primera ley de Fick,

$$F = \frac{dQ}{dt} = -D \frac{dc}{dx} \quad 3.21$$

donde:

F : Flujo de humedad por unidad de área ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Q : Es la cantidad de agua por unidad de área, que permea el material (kg m^{-2})

³ General Electric Co.

- t : Tiempo (s)
 c : Concentración de humedad (kg H₂O/kg papel)
 x : Distancia en la dirección del flujo de humedad, perpendicular a la superficie, (m)
 D : Coeficiente de difusión (m² s⁻¹)

Considerando un coeficiente de difusión constante e independiente de la concentración de humedad, Ast estimó el coeficiente de difusión como:

$$D = - \frac{dQ}{dt} \bigg/ \frac{dc}{dx} \bigg|_{x=l} \quad 3.22$$

donde $x=l$ corresponde con la superficie seca y $x=0$ con la húmeda.

Asumiendo un perfil de concentración de humedad lineal, la variación de concentración en la frontera húmeda puede calcularse como:

$$\frac{dc}{dx} \bigg|_{x=l} = \frac{(c_1 - c_2)}{l} \quad 3.23$$

donde:

- c_1 : Concentración de humedad en la superficie húmeda
 c_2 : Concentración de humedad en la superficie seca
 l : Espesor de la membrana

Como resultado de sus experimentos Ast encontró valores del coeficiente de difusión de humedad, para varios valores de temperatura y concentración de humedad, como se muestra en la Tabla 3.1.

Es necesario señalar que al aplicar esta metodología Ast asumió dos hipótesis importantes. Por una parte supuso que cada superficie permanece en equilibrio con su propia atmosfera, lo que es equivalente a considerar que la difusión se produce a través de una superficie de espesor infinitesimal. Por otra parte, consideró que la concentración de humedad en el interior del papel varía linealmente con el espesor; esto en realidad no es cierto, ya que el coeficiente de difusión en aislamientos celulósicos depende de la concentración, y por lo tanto el perfil de concentración de humedad no es lineal.

Tabla 3.1 Datos experimentales y valores estimados del coeficiente de difusión obtenidos por Ast, tomado de [26].

Datos experimentales				Valores estimados	
l (cm)	T (°C)	c_2 (g cm ⁻³)	c_1 (g cm ⁻³)	D (cm ² día ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹) ⁴
0,0515	15,6	0	0,0595	0,0309	$3,5764 \times 10^{-11}$
0,0518	30	0	0,0552	0,0838	$9,6991 \times 10^{-11}$
0,0518	51	0	0,0170	0,331	$3,8310 \times 10^{-10}$
0,0518	51	0	0,0358	0,353	$4,0856 \times 10^{-10}$
0,0518	82	0,00195	0,0312	3,74	$4,3287 \times 10^{-9}$
0,126	15,6	0	0,0595	0,0512	$5,9259 \times 10^{-11}$
0,126	30	0	0,0552	0,128	$1,4815 \times 10^{-10}$
0,128	80	0,002	0,0312	4,59	$5,3125 \times 10^{-9}$

3.5.2 Método empleado por Guidi y Fullerton

En 1974 Guidi y Fullerton [40, 34], presentaron un trabajo en el cual aplicaban un modelo de difusión para estimar los tiempos de secado de transformadores de potencia en fábrica (secado bajo vacío), así como la adsorción de humedad de los aislamientos al estar expuestos a una atmosfera húmeda. A partir de los resultados de este trabajo propusieron las ecuaciones empíricas 3.24 y 3.25 con las que relacionan la dependencia del coeficiente de difusión de papeles impregnados de aceite, respecto de la concentración local de humedad y la temperatura del aislamiento. Al combinar estas dos ecuaciones se obtiene la ecuación 3.26, la cual es una expresión generalizada para el coeficiente de difusión de humedad, que fue posteriormente empleada por otros autores como Foss [33, 34], y Du [26].

$$D(c, T_k) = D_0 \cdot e^{k \cdot c} \quad 3.24$$

$$D_0 = D_G \cdot e^{E_a \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right)} \quad 3.25$$

$$D(c, T_k) = D_G \cdot e^{\left[k \cdot c + E_a \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right]} \quad 3.26$$

donde:

- D : Coeficiente de difusión (m² s⁻¹)
- c : Concentración local de humedad (kg H₂O/Kg)
- T_k : Temperatura (K)
- T_0 : Temperatura de referencia (298 K)

⁴ El valor de esta columna ha sido calculado para que las unidades coincidan con las empleadas en esta tesis

- k : Parámetro adimensional que relaciona la dependencia con la concentración de humedad
- D_G : Factor pre-exponencial del coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
- E_a : Energía de activación (K)

El procedimiento seguido por estos autores para la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión no es explicado en detalle en este trabajo, ya que las investigaciones se desarrollaron en el Departamento de Transformadores de Potencia de General Electric y en buena medida se encuentran documentadas en informes internos de dicha compañía. Sin embargo, con la información encontrada en [26] y en el trabajo presentado por Foss [34], es posible hacer una descripción general del método seguido por Guidi y Fullerton para la determinación del coeficiente de difusión de humedad.

Los especímenes de prueba empleados en los experimentos de Guidi y Fullerton, consistieron en múltiples capas de papel Kraft, impregnadas de aceite. Se realizaron experimentos de adsorción de humedad sobre muestras secas, empleando una cámara climática, y experimentos de secado bajo vacío sobre muestras previamente humedecidas.

Las muestras se extraían en diferentes instantes del proceso de humectación o secado y, mediante análisis por Karl Fischer, se determinaban los valores de humedad a distintas profundidades del espesor. Después, mediante el método de mínimos cuadrados, se ajustaban los valores de humedad a un polinomio de alto grado, el cual representa el perfil de concentración de humedad (concentración de humedad en función de la profundidad o distancia). La Figura 3.9 presenta las concentraciones de humedad medidas y los perfiles de concentración estimados en un experimento de adsorción de humedad en papel Kraft (50% de humedad relativa y 22 °C), para tiempos de exposición de 4, 9 y 25 días.

Con las ecuaciones de los perfiles de concentración y la ecuación 3.27, dada por Crank [20], Guidi y Fullerton obtuvieron los distintos valores del coeficiente de difusión que posteriormente relacionaron con la concentración de humedad y la temperatura mediante los parámetros D_G , k y E_a de la ecuación 3.26.

$$D(c) = -\frac{1}{2t} \cdot \frac{dx}{dc} \bigg|_c^{c_0} \cdot \int_{c_0}^c x \cdot dc \quad 3.27$$

donde:

- t : Tiempo de exposición
 x : Profundidad o distancia en el aislamiento
 c_0 : Concentración inicial de humedad
 c : Concentración de humedad en el punto x

Los parámetros del coeficiente de difusión para papel Kraft impregnado de aceite, encontrados por Guidi y Fullerton fueron $D_G = 6,44 \times 10^{-14} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$, $k = 0,5$ y $E_a = 7700 \text{ (K)}$.

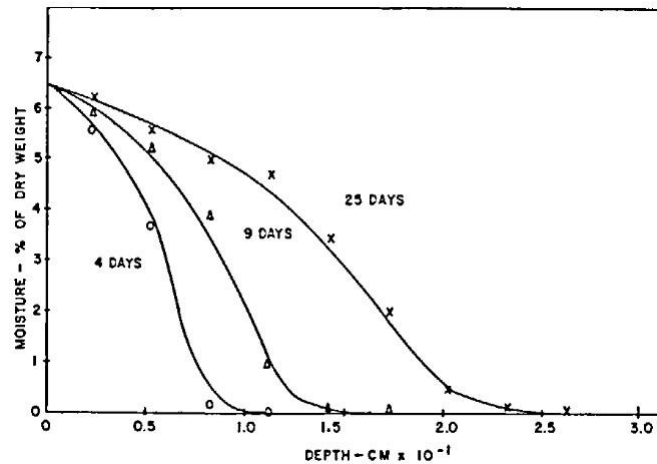


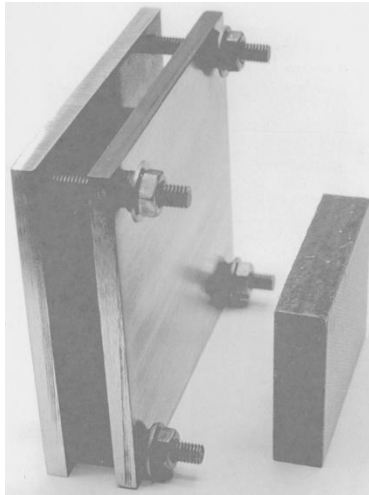
Figura 3.9 Concentración y perfiles de concentración de humedad durante un proceso de adsorción. Las líneas continuas son los perfiles de concentración dibujados a partir de las ecuaciones polinómicas. Tomada de [40].

3.5.3 Método empleado por Howe y Asem

En 1975 Alan F. Howe [47], de la Universidad de Nottingham determinó el coeficiente de difusión de humedad del papel empleado como aislamiento de los conductores de los transformadores, así como el coeficiente de difusión longitudinal de los cartones prensados usados en los finales de los arrollamientos. En ambos casos, las determinaciones se realizaron sobre aislamientos no impregnados de aceite.

Los especímenes de prueba de cartón prensado usados por Howe, consistieron en placas de 70 mm de largo por 50 mm de ancho y 15 mm de espesor, comprimidas entre un par de placas de acero a una presión de $500 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. Con esto

se pretendía simular las fuerzas a las que normalmente están sometidos estos aislamientos en el transformador (Figura 3.10 a). Las muestras de papel correspondieron con tiras de papel de 12 mm de ancho y 0,045 mm de espesor, dispuestas en 50 capas arrolladas sobre un tubo de cobre de 21,5 mm de diámetro y 178 mm de largo. El espesor total del aislamiento analizado fue de 4,5 mm (Figura 3.10 b).



(a)



(b)

Figura 3.10 Fotografías de las muestras usadas por Howe. (a) cartón prensado, (b) papel.

El experimento realizado por Howe consistió en secar previamente las muestras de papel y cartón a una temperatura de 113 °C, durante cuatro días. Para ello empleó un horno que permitía aplicar vacío y que adicionalmente contaba con una trampa fría a base de nitrógeno líquido. Con esto consiguió un secado casi completo de las muestras.

Posteriormente estas muestras fueron sometidas a un proceso de humectación en una cámara climática con humedad relativa de 44% y temperatura de $64\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. En distintos instantes de la humectación, se sacaba una muestra de la cámara climática y se seccionaban trozos de aislamiento a diferentes profundidades. Mediante medición del peso determinó la humedad promedio para cada trozo analizado. A partir de estos valores, Howe estimó un perfil de concentración de humedad para distintos instantes del proceso de humectación.

Una vez obtenidos los perfiles de concentración de humedad, Howe resolvió el modelo de difusión por la técnica de las diferencias finitas y mediante ajuste de curvas obtuvo los valores del coeficiente de difusión mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Howe.

c (%)	D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	
	Cartón prensado	Papel Manila
1	$(4,5 \pm 2,0) \times 10^{-10}$	$(0,6 \pm 0,15) \times 10^{-11}$
2	$(1,8 \pm 0,9) \times 10^{-10}$	$(0,9 \pm 0,2) \times 10^{-11}$
3	$(0,9 \pm 0,5) \times 10^{-10}$	$(1,3 \pm 0,4) \times 10^{-11}$
4	-----	$(2,5 \pm 0,8) \times 10^{-11}$

Aziza S. Asem en 1981 [4], siguiendo la metodología de Howe, determinó el coeficiente de difusión para papeles y cartones sin impregnar. También determinó el coeficiente de difusión en aislamientos impregnados sirviéndose en este caso de un proceso de secado.

Los experimentos de secado realizados por Asem consistieron en someter las muestras de papel previamente humedecidas en una cámara climática (a 60°C y 44% de humedad relativa), tanto impregnadas como no impregnadas de aceite, a un proceso de secado en un horno bajo vacío. La temperatura aplicada durante el secado fue 80°C , realizándose experimentos a presión atmosférica y a $1,3 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ($1,3 \times 10^{-5} \text{ bar}$). El horno empleado tenía además adosada una trampa fría, que creaba un gradiente de presión de vapor de agua alrededor de las muestras, fomentando la desorción de humedad del aislamiento.

En el caso de los papeles impregnados de aceite, Asem no realizó la determinación de la concentración de humedad mediante medición del peso, como había hecho Howe, sino a través de valoración por el método de Karl Fischer. Este método, como se ha indicado anteriormente, tiene la ventaja de ser selectivo ya que la reacción química únicamente se produce con el agua y no con el aceite. Si se hubiera empleado el método de variación de peso, hubiera sido difícil discriminar qué parte de la pérdida de peso se debe a pérdida de agua y cuál se debe a evaporación de aceite. Al igual que en el trabajo realizado por Howe, Asem considera la dependencia del coeficiente de difusión con la concentración de humedad no a través de una relación matemática sino mediante gráficas como la

mostrada en la Figura 3.11 o mediante valores discretos como los de las tablas 3.3 y 3.4.

En el trabajo de estos autores no se obtuvo la dependencia del coeficiente de difusión de humedad respecto a la temperatura, ya que los distintos experimentos fueron realizados a una única temperatura.

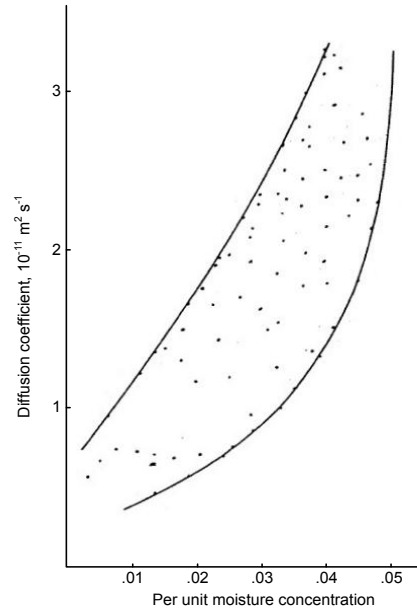


Figura 3.11 Gráfica del coeficiente de difusión, para papel sin impregnar, obtenida por Asem mediante experimentos de humectación.

Tabla 3.3 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Asem, obtenidos a partir del experimento de humectación.

c (%)	D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)		
	Cartón prensado	Papel sin impregnar	Papel Impregnado
1	$(11,0 \pm 5,75) \times 10^{-10}$	$(0,74 \pm 0,36) \times 10^{-11}$	$(0,54 \pm 0,34) \times 10^{-11}$
2	$(5,3 \pm 2,5) \times 10^{-10}$	$(1,18 \pm 0,58) \times 10^{-11}$	$(0,82 \pm 0,48) \times 10^{-11}$
3	$(3,6 \pm 1,7) \times 10^{-10}$	$(1,64 \pm 0,78) \times 10^{-11}$	$(1,22 \pm 0,58) \times 10^{-11}$
4	$(2,7 \pm 1,3) \times 10^{-10}$	$(2,16 \pm 0,92) \times 10^{-11}$	$(1,94 \pm 0,74) \times 10^{-11}$

Tabla 3.4 Valores del coeficiente de difusión encontrados por Asem, obtenidos a partir del experimento de humectación.

c (%)	D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)		
	Papel sin impregnar (presión atmosférica)	Papel sin impregnar (vacío)	Papel Impregnado (vacío)
1	$2,4 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$
2	$3,8 \times 10^{-10}$	$6,9 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$
3	$5,6 \times 10^{-10}$	$10,7 \times 10^{-10}$	$6,8 \times 10^{-10}$

3.5.4 Método empleado por Foss

Stephen Foss en 1987 [33], propuso valores para los parámetros de la ecuación empírica propuestas por Guidi y Fullerton años antes (ecuación 3.26). Para ello tomó los datos experimentales para papeles impregnados obtenidos por Ewart [30], con los que determinó la dependencia del coeficiente de difusión respecto de la concentración de humedad. Además empleó los datos experimentales de Ast [6] para papeles sin impregnar, con los cuales encontró la dependencia del coeficiente de difusión respecto a temperatura. La Tabla 3.5 resume los parámetros del coeficiente de difusión reportados por Foss.

Tabla 3.5 Parámetros del coeficiente de difusión de humedad en papeles aislantes encontrados por Foss.

Tipo de Aislamiento	k	D_G ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	E_a (K)
Papel Kraft impregnado de aceite	0,5	$1,34 \times 10^{-13}$	8074
Papel Kraft sin impregnar	0,5	$2,62 \times 10^{-11}$	8140

El trabajo realizado por Foss es discutido y criticado por Du [26], indicando que el coeficiente de Foss “siempre da valores más altos”, al compararlo con los resultados obtenidos por otros investigadores así como por los obtenidos por ella misma.

Debido a que la información de las investigaciones realizadas por Foss está recogida en reportes internos de General Eléctric, la información detallada de los procedimientos no está disponible. En esta tesis sin embargo, se hace mención a su trabajo debido a que muchos de las investigaciones que se encuentran en la literatura técnica sobre dinámica de humedad en aislamientos celulósicos, emplean los valores de coeficiente de difusión propuestos por este autor.

3.5.5 Metodología empleada por Du

Yanqing Du del MIT en 1999 [26, 27], determinó el coeficiente de difusión de humedad de cartón prensado no impregnado de aceite (tipo Hi Val de Weidmann), como función de la temperatura y de la concentración de humedad. Para ello empleó un sensor dielectrométrico interdigital de 3 longitudes de onda con el que obtuvo los perfiles de concentración de humedad sobre muestras de cartón sometidas a un proceso de adsorción de humedad. La Figura 3.12 presenta el esquema del experimento implementado por Du.

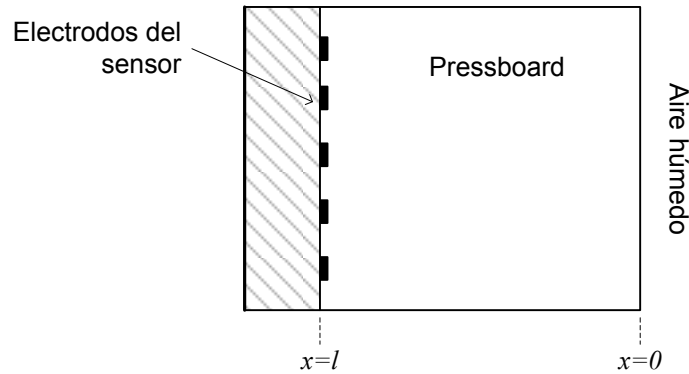


Figura 3.12 Esquema del experimento realizado por Du para determinación de los perfiles de concentración de humedad en cartón prensado.

La muestra de cartón prensado, inicialmente libre de humedad, es expuesta en una de sus caras a un flujo de aire con humedad y temperatura controladas. Para asegurar difusión unidireccional, las demás caras expuestas se sellaron con pegamento de silicona. Con ayuda del sensor dielectrométrico se estimaron los perfiles de concentración de humedad de la muestra de cartón. Los perfiles se determinaron cada dos horas durante un periodo de 30 horas.

La Figura 3.13 es un ejemplo de los perfiles de concentración de humedad estimados por Du a partir de las mediciones del sensor dielectrométrico. En esta figura en particular, la cara de la muestra de cartón expuesta al aire húmedo corresponde con la coordenada cero mientras que la cara en contacto con el sensor es la opuesta.

Para poder determinar la dependencia del coeficiente de difusión respecto de la temperatura y la concentración de humedad, el experimento se repitió para concentraciones de equilibrio en el cartón de 1,8% y 3%, y temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C y 70 °C.

Para modelar la difusión de humedad hacia el interior del cartón, Du empleó la segunda ley de Fick (ecuación 3.28), y consideró una concentración de humedad inicial nula ($c_0 = 0$). Como condiciones de frontera consideró las dos siguientes:

- Concentración de equilibrio ($c = c_e$), en la cara en contacto con el aire húmedo. Esta concentración se calcula con la temperatura y humedad relativa del aire a partir de las curvas de Jeffries [55].
- Flujo de humedad nulo en la cara que está en contacto con el sensor.

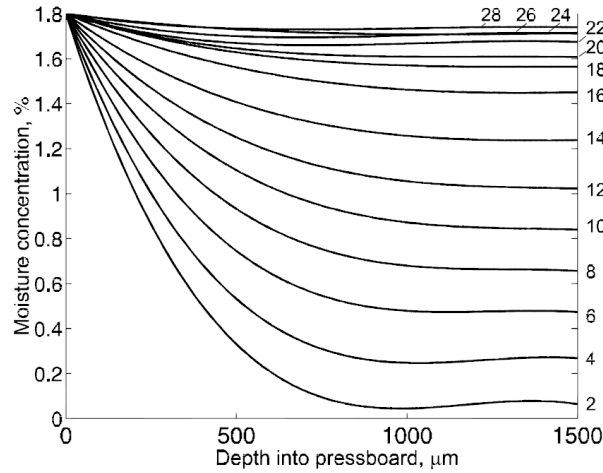


Figura 3.13 . Perfiles de concentración de humedad calculados a partir de mediciones dielectrométricas sobre una muestra de cartón sin impregnar de aceite sometida a un proceso de adsorción de humedad. Tomada de [26].

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \cdot \frac{dc}{dx} \right) \quad 3.28$$

Du obtuvo la solución al modelo matemático del experimento, utilizando el método de las diferencias finitas mediante el procedimiento matemático descrito a continuación.

Definiendo $dz = D \cdot c$, la ecuación 3.28 se puede reescribir como:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d^2 z}{dx^2} \quad 3.29$$

Expresando las derivadas de la ecuación 3.29 mediante las diferencias finitas (ecuaciones 3.16 y 3.20), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{c_j^{n+1} - c_j^n}{\Delta t} = \frac{z_{j+1}^{n+1} - 2z_j^{n+1} + z_{j-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad 3.30$$

donde el superíndice n corresponde con el paso de tiempo y el subíndice j con la discretización espacial.

Du usó la expresión generalizada para el coeficiente de difusión propuesta por Guidi (ecuación 3.26), con lo cual la variable z puede escribirse como:

$$z = \frac{D_g}{k} \cdot e^{\left[k \cdot c + E_a \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right]} \quad 3.31$$

Usando la expansión en series de Taylor y la representación de la primera derivada de una función mediante la diferencia finita, la ecuación para z en el tiempo $n+1$ y en el punto j del aislamiento puede expresarse como:

$$z_j^{n+1} = z(c_j^n) + [c_j^{n+1} - c_j^n] \cdot D(c_j^n) \quad 3.32$$

Usando expresiones similares para z en las posiciones $j+1$ y $j-1$, y luego remplazándolas en la ecuación 3.30, se obtiene una ecuación con la que es posible obtener de manera numérica, en cada intervalo de tiempo n , los valores de concentración de humedad en cada una de las j posiciones del interior del espécimen de prueba. Si se considera la temperatura constante, esta ecuación es dependiente de los parámetros D_G , k y E_a del coeficiente de difusión.

Finalmente, mediante un ajuste por mínimos cuadrados, Du encontró los valores de los parámetros del coeficiente de difusión (D_G , k y E_a), que minimizan el error entre los perfiles de concentración estimados a partir de las medidas del sensor dielectrométrico interdigital, y los perfiles estimados mediante el modelo matemático resuelto mediante el método de diferencias finitas.

Los valores de los parámetros del coeficiente de difusión (ecuación 3.26), hallados por Du, para el tipo de cartón prensado estudiado fueron $D_G = 0,67 \times 10^{-12}$ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), $k = 0,5$ y $E_a = 7646$ (K).

3.5.6 Clasificación de las metodologías de los diferentes autores

En la Tabla 3.6 se resumen las metodologías empleadas por los autores citados anteriormente para la determinación del coeficiente de difusión de aislamientos celulósicos.

Esta clasificación se ha hecho de acuerdo a los criterios descritos en el apartado 3.1. En la tabla se ha excluido la clasificación de la metodología de Foss, ya que éste no realizó experimentos propios y porque no se dispone de información detallada sobre la manera en que encontró los parámetros de los coeficientes de difusión a partir de los valores experimentales de otros investigadores.

Tabla 3.6 Clasificación de las metodologías seguidas por otros autores, para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador.

Autor(es)	Tipo de experimentos									Base del modelo matemático		Método de solución del modelo matemático				
	Gravimetricos			Perfiles de concentración												
	Permeación	Cinética de absorción	Secado	Seccionado	Técnicas radiográficas	RMN	Análisis químico	Dielectrometría	Otros	Flujo de humedad	Difusión	Forma directa	Simplificado	Régimen regular	Diferencias finitas	Elementos finitos
Ast	X									X		X				
Guidi y Fullerton							X				X		X			
Howe y Asem				X			X				X				X	
Du								X			X				X	

Capítulo 4

Determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles sin impregnar

Para estimar de manera precisa la migración de humedad dentro de los aislamientos sólidos de un transformador de potencia mediante un modelo matemático de difusión, es necesario disponer de un adecuado valor del coeficiente de difusión de humedad o difusividad.

En este capítulo se muestra la metodología seguida en la estimación del coeficiente de difusión de humedad de papel aislante de transformador no impregnado (papel Kraft). La metodología propuesta emplea las curvas de secado de muestras de papel, obtenidas mediante un analizador termogravimétrico (TGA). Posteriormente, mediante un proceso de optimización por algoritmos genéticos (AG), se determinan los parámetros del coeficiente de difusión de humedad. La función objetivo del proceso de optimización por algoritmos genéticos, tiene como núcleo un modelo de secado basado en la segunda ley de Fick, que ha sido resuelto mediante el método de los elementos finitos (MEF).

Como resultado se proponen dos ecuaciones para el coeficiente de difusión de humedad en papeles sin impregnar. La primera ecuación es dependiente de la concentración local de humedad y de la temperatura de la muestra, lo que es coherente con los trabajos de otros autores. La segunda ecuación propuesta para el coeficiente de difusión de humedad, además de la dependencia con la concentración local de humedad y la temperatura del aislamiento, incluye la dependencia con respecto al espesor del aislamiento. Este comportamiento no ha sido reportado antes para materiales celulósicos empleados como aislamiento en equipos eléctricos, aunque sí ha sido observado en otros materiales de tipo higroscópico.

Finalmente se muestra la validación experimental de las ecuaciones propuestas para el coeficiente de difusión de humedad. Para ello se han comparado curvas de secado obtenidas experimentalmente con las curvas de secado obtenidas por medio de simulación, usando el modelo de secado por elementos finitos. Algunas de las curvas de secado empleadas para el proceso de validación se obtuvieron bajo temperatura constante y otras bajo temperatura variable. Los resultados se comparan con las curvas de secado simuladas al emplear el coeficiente de difusión para papeles sin impregnar propuesto por Foss [33, 34].

4.1 Determinación de las curvas de secado mediante TGA

Como se expuso en el capítulo 3, el análisis termogravimétrico es un método experimental que ha sido ampliamente usado para la obtención del coeficiente de difusión de humedad de diversos materiales. La metodología planteada en esta tesis para la obtención del coeficiente de difusión de humedad, emplea las curvas de secado de muestras de papel, obtenidas experimentalmente mediante un analizador termogravimétrico o TGA por sus siglas en inglés.

El analizador TGA permite realizar ensayos de secado en los que se registra de manera continua la pérdida de peso de una muestra (de papel o de cualquier otro material), bajo unas condiciones térmicas controladas.

En los experimentos realizados se ha empleado nitrógeno como gas de purga del horno del TGA. El uso de este gas es adecuado para prevenir la oxidación de las muestras de aislamiento sometidas a ensayo. Adicionalmente se asegura una atmosfera libre de humedad durante los secados.

Para la obtención de las curvas de secado de los papeles aislantes con el TGA, es necesario determinar, de la manera más precisa posible, la disminución de humedad en una muestra de papeles aislantes de un transformador cuando se somete a un proceso de secado. Para lograr los espesores de papel requeridos para los experimentos se apilan varias capas de papel. Con el fin de forzar la desorción de humedad de manera unidireccional, como ocurre en el aislamiento de los conductores de un transformador, las capas apiladas de papel son introducidas en un recipiente de politetrafluoroetileno (PTFE) con una única abertura en la parte superior.

La Figura 4.1 muestra un corte transversal del horno del analizador termogravimétrico. La muestra de papel es introducida en el recipiente de PTFE el cual se coloca sobre un pozuelo portamuestra fabricado en platino. Este pozuelo está suspendido, a través de un alambre también de platino, de la balanza del analizador, que es el elemento que permitirá determinar de manera precisa la pérdida de peso de la muestra de papel durante el experimento de secado.

El pozuelo de platino y el recipiente con la muestra de papel se sitúan dentro de un tubo de cuarzo que está rodeado por las resistencias eléctricas empleadas para la calefacción.

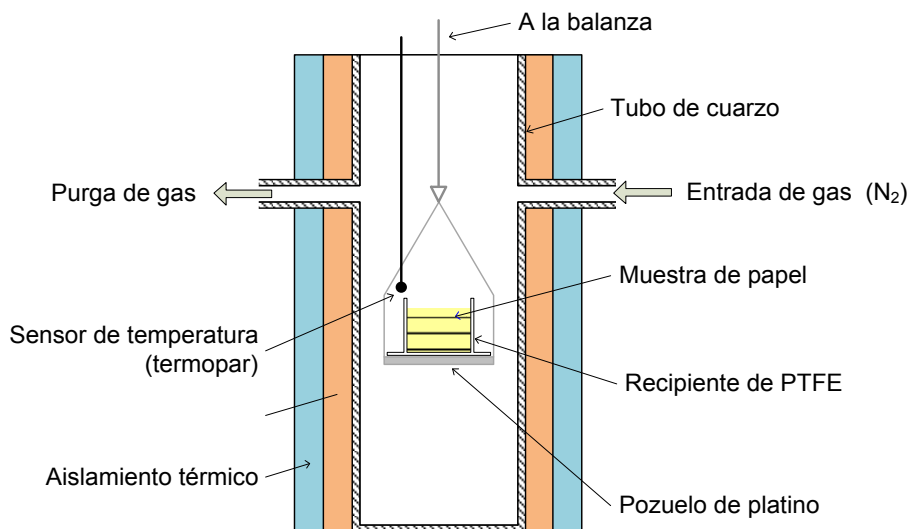


Figura 4.1 Corte del horno del TGA.

Durante el secado de papeles sin impregnar, la pérdida de masa se debe a la desorción de humedad (Figura 4.2), por ello, aplicando la ecuación 4.1, es posible calcular la variación de la concentración media de humedad de la muestra en función del tiempo o lo que es lo mismo, la curva de secado de la muestra (Figura 4.3).

$$C_{m-TGA}(t) = \frac{W_{TGA}(t) - W_{DS}}{W_{DS}} \cdot 100 \quad 4.1$$

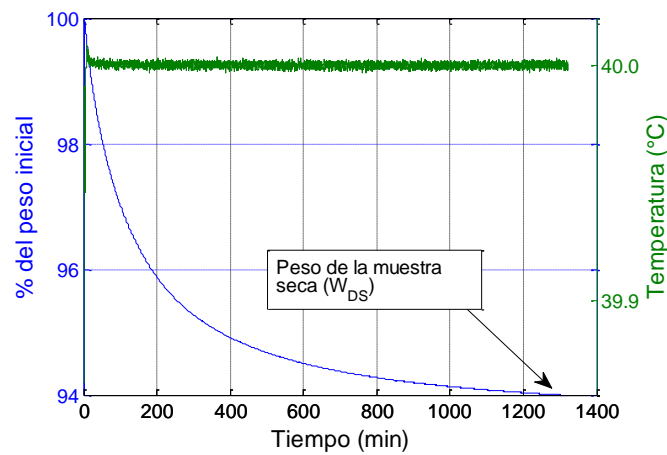


Figura 4.2 Pérdida de masa de una muestra de papel durante un secado a temperatura constante de 40 °C.

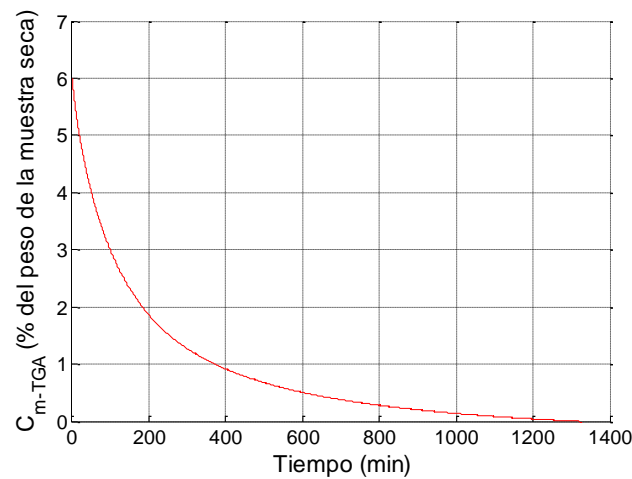


Figura 4.3 Curva de secado calculada a partir de los datos de pérdida de masa de la Figura 4.2.

4.2 Modelo MEF para simular el secado del papel aislante de transformador

Para estimar los parámetros del coeficiente de difusión, es preciso modelar las curvas de secado de las muestras de papel obtenidas, de forma que se reproduzca el experimento realizado con el TGA. Para simular la desorción de humedad del aislamiento de papel se utiliza un modelo matemático de difusión.

Dado que el coeficiente de difusión de la humedad en los materiales celulósicos depende de la concentración de humedad, el modelo matemático de difusión corresponde a una ecuación diferencial de segundo orden de tipo no lineal, lo que hace necesario emplear un método numérico para su resolución. El modelo de

difusión correspondiente a la segunda ley de Fick (ecuación 4.2), se ha resuelto mediante la técnica de los elementos finitos (MEF), empleando la herramienta computacional *Comsol Multiphysics*® versión 3.5a.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad 4.2$$

El modelo de simulación del experimento de secado realizado mediante el TGA, se implementó tomando como base el modelo de secado de aislamientos de transformador desarrollado por Almendros [2].

Para implementar un modelo mediante la técnica de los elementos finitos, es necesario definir la geometría, las propiedades físicas del material (las cuales están relacionadas con el fenómeno a simular), las fuentes o entradas independientes y las condiciones de borde o frontera. A continuación se hace una descripción del modelo implementado.

4.2.2 Geometría

Tal como se explicó en la descripción del modelo matemático de difusión para el análisis de la migración de humedad en el interior de los aislamientos celulósicos del transformador (capítulo 2, apartado 2.4.1), al existir equilibrio local de temperatura durante el secado, la humedad se difunde desde el interior del aislamiento hacia el medio externo en el sentido longitudinal del espesor. Por esta razón, para el modelo de elementos finitos del experimento de secado en el TGA, la geometría se puede considerar unidimensional como se ilustra en la Figura 4.4. El aislamiento se ha representado por tanto como una línea de longitud l , correspondiente con un corte a lo largo del espesor de la muestra de papel.

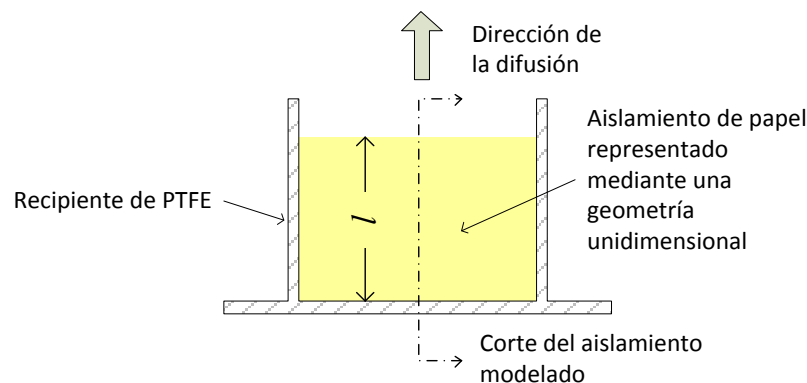


Figura 4.4 Geometría empleada en el modelo de secado MEF.

4.2.3 Propiedades físicas

El único material representado en el modelo es el aislamiento de papel y dado que el fenómeno estudiado es el de difusión de humedad, la propiedad física a definir en este caso es el coeficiente de difusión.

El coeficiente de difusión de humedad se representa mediante una expresión empírica como la mostrada en la ecuación 4.3 [40, 61], en la cual el parámetro k relaciona la dependencia del coeficiente con respecto a la concentración local de humedad y el parámetro D_0 la dependencia con la temperatura.

$$D(c, T) = D_0 \cdot e^{k \cdot c} \quad 4.3$$

Al caracterizar el material con un coeficiente de difusión de humedad efectivo, se ha considerado el aislamiento como un medio homogéneo, unificando los dos mecanismos de transporte de humedad que tienen lugar en el interior del papel: el mecanismo que considera movimiento del agua en forma de vapor y el que tiene en cuenta el movimiento del agua en forma condensada. Adicionalmente se desprecia el hecho de que el aislamiento está compuesto por diversas capas de papel con interfaces de aire o gas entre ellas. Esto es posible porque el apilamiento de las capas de papel se hace con una adecuada compresión para hacer mínimo el espesor de dichas interfaces.

4.2.4 Entradas del modelo

Las entradas al modelo son la temperatura de la muestra de papel (T), y la concentración inicial de humedad del aislamiento (c_0).

La temperatura del aislamiento puede ser constante o variable, tanto en el tiempo como a lo largo del espesor de la muestra de papel. En el modelo de secado MEF implementado, la temperatura del aislamiento durante el secado se considera igual a la temperatura de consigna del horno del TGA, es decir, un valor constante en el tiempo, puesto que el secado que se pretende simular es de tipo isotérmico.

Como se mencionó anteriormente, las constantes de tiempo del fenómeno de transferencia térmica son menores que las constantes de tiempo del fenómeno de difusión [2, 5]. Por ello se puede asumir que la temperatura es constante a lo largo del espesor del aislamiento, despreciando incluso el enfriamiento causado por la

evaporación de la humedad, que ocurre en la superficie en que el papel hace contacto con el medio externo.

Las muestras que se sometan a secado deben tener una humectación homogénea al inicio del experimento, lo que se logra con una adecuada preparación de las mismas. Por ello la concentración de humedad inicial se considera constante en todo el espesor del aislamiento. El valor de humedad inicial puede determinarse a partir de las curvas de secado obtenidas con el TGA o mediante valoración volumétrica de humedad por el método de Karl Fischer.

4.2.5 Condiciones de frontera

En el modelo es necesario establecer dos condiciones de frontera. La primera se impone en la parte inferior de la muestra de papel, donde ésta hace contacto con el recipiente de PTFE (cara inferior del aislamiento Figura 4.4). En dicha frontera se considera que existe una condición de aislamiento o impermeabilidad y por tanto solo puede haber desorción de humedad hacia la cara superior de la muestra.

La segunda condición de frontera se da en el punto donde la muestra de papel está en contacto con el flujo de nitrógeno (cara superior del aislamiento Figura 4.4). Allí se considera que la condición corresponde a una concentración de equilibrio. Esto es posible ya que si se fuerza un adecuado flujo de nitrógeno, la tasa de evaporación de humedad en la superficie de la muestra es suficientemente alta para considerar que existe un permanente equilibrio de humedad relativa en la interface entre el papel y el nitrógeno.

El valor de concentración de equilibrio considerado en el modelo es igual a cero ($C_e = 0$), porque el nitrógeno tiene un aporte nulo de humedad a la muestra de papel.

4.2.6 Salida del modelo

La resolución del modelo de difusión da como resultado la concentración local de humedad o perfil de humedad a lo largo del espesor de la muestra, para cada instante de tiempo $c_{est}(x,t)$, tal y como se muestra en la Figura 4.5.

Para poder comparar los valores obtenidos por el modelo de secado MEF, con los obtenidos experimentalmente, se debe calcular la concentración media de humedad en cada instante, haciendo uso de la ecuación 4.4.

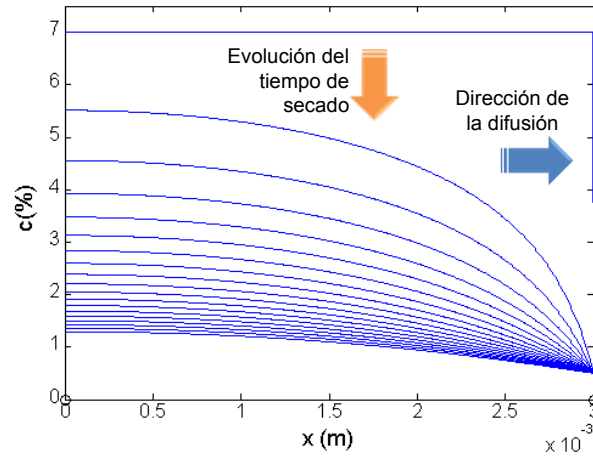


Figura 4.5 Evolución de la concentración local de humedad, obtenida mediante el modelo de secado por elementos finitos.

$$C_{m-est}(t) = \frac{1}{l} \cdot \int_{x=0}^{x=l} c_{est}(x,t) dx \quad 4.4$$

La diferencia entre los valores de concentración media estimados con el modelo de secado MEF (C_{m-est}), y los experimentales, obtenidos a partir de las pruebas en el TGA (C_{m-TGA}), dependerán del valor del coeficiente de difusión empleado en la simulación.

La obtención del valor del coeficiente de difusión se hace por ajuste sucesivo de sus parámetros (k y D_0) en el modelo de simulación, hasta obtener un error aceptable entre los valores de concentración media estimados y los obtenidos experimentalmente. Este ajuste es realizado por el proceso de optimización de algoritmos genéticos como se describe a continuación.

4.3 Proceso de optimización por algoritmos genéticos

Para obtener la expresión del coeficiente de difusión de humedad en el papel, es necesario determinar el valor de los parámetros k y D_0 de la ecuación 4.3.

La obtención de estos parámetros se puede lograr mediante un proceso de optimización que permitirá encontrar los valores que minimizan el error entre la concentración media obtenida con los experimentos de secado en el TGA (C_{m-TGA}), y la concentración media obtenida mediante simulación a través del modelo de secado por elementos finitos (C_{m-est}).

Para abordar el proceso de optimización se decidió emplear la técnica de los algoritmos genéticos (AG), ya que el problema se puede enfocar como una búsqueda y esta es una de las principales aplicaciones de esta técnica de inteligencia artificial.

La mayor parte de los métodos clásicos de optimización para funciones no lineales, como por ejemplo los métodos de Newton-Raphson o Levenberg-Marquardt, utilizan el gradiente para determinar la dirección de crecimiento o decrecimiento de la función objetivo, con lo cual la función optimizada debe ser derivable. En este caso la función objetivo no es una función derivable, ya que involucra el modelo de elementos finitos como núcleo, por lo que estos métodos de optimización no serían aplicables.

La ventaja de usar los algoritmos genéticos para la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión, es que los algoritmos genéticos ven la función objetivo como una caja negra en la cual se introducen unos valores de entrada, donde se incluyen los parámetros a determinar y se obtiene un único valor de salida que se compara con el valor objetivo.

La desventaja del uso de los algoritmos genéticos en el proceso de optimización, es que estos no son un método determinístico, y por ello no hay garantías de que los valores de encontrados no correspondan a un mínimo local de la función objetivo. Para minimizar este riesgo, es necesario dotar de aleatoriedad a la búsqueda.

A continuación se detalla el proceso de optimización por algoritmos genéticos implementado en esta tesis. Primero se hace una descripción general de la técnica de los algoritmos genéticos, luego se describen la función objetivo y la función de optimización, indicando los ajustes usados en sus parámetros.

4.3.1 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son un método inspirado en la evolución biológica que realiza búsquedas dirigidas basadas en probabilidad (búsquedas heurísticas), es decir se podrían considerar como un método de tipo estocástico. Los algoritmos genéticos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias, semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados que son quienes sobreviven de una generación a otra, y cuáles los menos aptos, que son descartados.

Para realizar una búsqueda por algoritmos genéticos deben definirse los siguientes parámetros:

- **Función objetivo:** es la función que se desea minimizar.
- **Individuo:** vector que contiene un conjunto de valores de todas las variables independientes que son entrada de la función objetivo.
- **Espacio de búsqueda:** es el rango de valores de las variables objeto de la búsqueda, dentro de los cuales estará contenida la población de cada generación.
- **Población:** es el conjunto de todos los individuos pertenecientes al espacio de búsqueda, generados como resultado de las operaciones genéticas y sobre los cuales se realiza la búsqueda.
- **Tamaño de la población:** representa el número de individuos del conjunto en el cual se busca la solución al problema de optimización. Un mayor tamaño de la población aumenta la probabilidad de encontrar los valores solución, correspondientes al mínimo de la función objetivo; sin embargo esto representa un aumento en el tiempo de cálculo pues el algoritmo debe evaluar la función objetivo con cada uno de los individuos de la población.
- **Población inicial:** es la población original con la que se inicia el proceso de búsqueda, puede predefinirse o generarse de manera aleatoria.
- **Número de generaciones:** es el número de veces en que se crea una nueva población a partir de los individuos que sobreviven de la generación anterior.
- **Función de cruce:** es el principal operador genético y representa la forma en que se combinan las características de dos individuos (padres), para generar uno o varios nuevos individuos (descendientes).
- **Función de mutación:** modifica al azar parte de las características de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.
- **Función de selección:** especifica cómo el algoritmo genético evalúa los individuos de una generación y escoge de entre ellos los más aptos para ser usados como los padres de la siguiente generación.

- Función de generación de población inicial: es la función empleada para crear de manera aleatoria la población inicial con la que se inicia la búsqueda.
- Valor objetivo o límite de ajuste: es el mínimo valor de la función objetivo para el cual se considera que el proceso de optimización ha alcanzado un resultado aceptable.

4.3.2 Función objetivo

La función objetivo se define como el procedimiento o conjunto de procedimientos que ante unos valores de entrada generan un valor de salida. El proceso de optimización actúa sobre los valores de entrada de esta función para lograr que la salida alcance un determinado valor (valor objetivo).

En la Figura 4.6 se presenta el esquema de la función objetivo, usada en el proceso de optimización para determinar el coeficiente de difusión de humedad del papel aislante. El núcleo de la función objetivo es el modelo de secado MEF descrito en el apartado 4.2.

Para cada caso experimental el modelo MEF tiene predefinidas la geometría, las condiciones de frontera, la temperatura y la concentración inicial de humedad, de modo que lo único que resta por definir son las características del material (mediante el coeficiente de difusión). Los valores de entrada a la función objetivo son los parámetros k y D_0 con los que se calcula el coeficiente de difusión de acuerdo a la ecuación 4.3.

Con el modelo de secado MEF se obtienen los perfiles estimados de concentración local de humedad (c_{est}). Con ellos, mediante la ecuación 4.4, se calculan los valores estimados de concentración media en cada instante de tiempo (C_{m-est}).

Por último se determina el valor de la función de error entre los valores de concentración media estimada y la concentración media obtenida de manera experimental por medio de los experimentos realizados con el TGA. Como medida de la función de error se ha escogido la distancia euclidiana, definida por la ecuación 4.5.

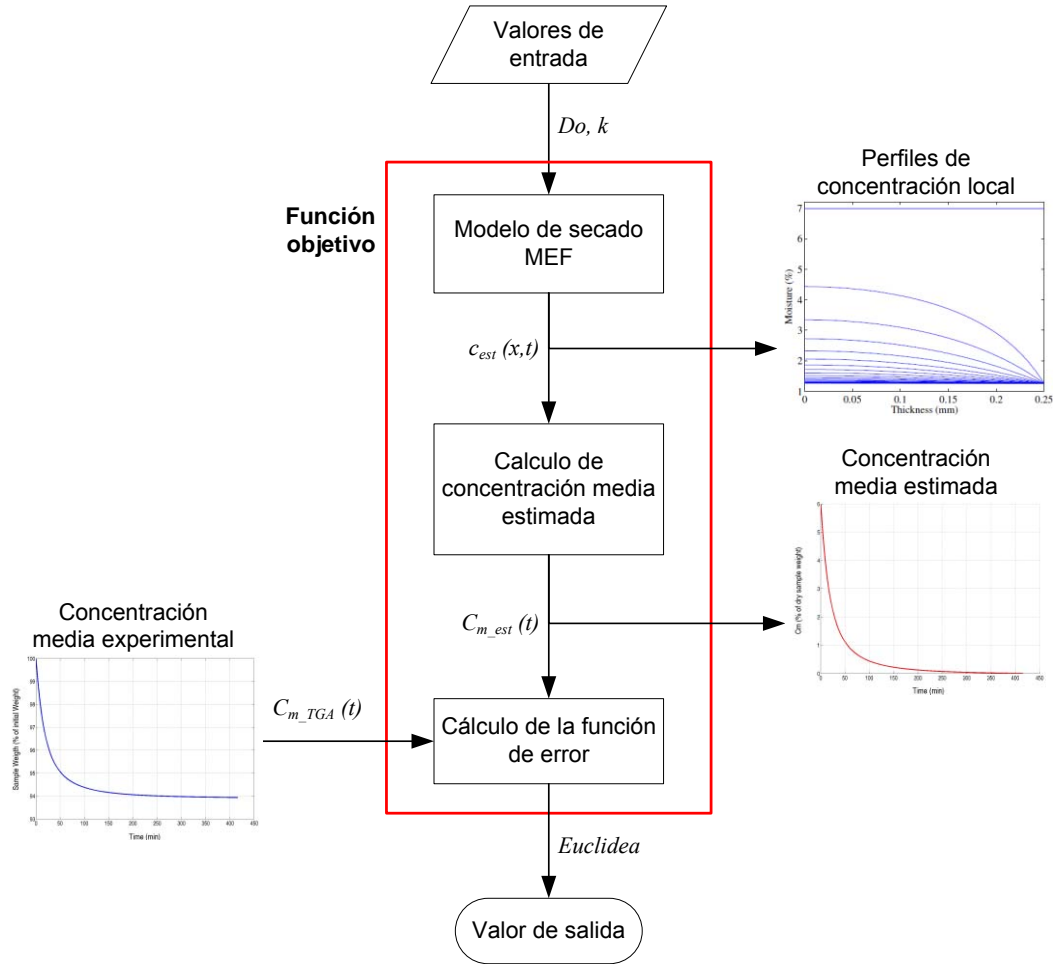


Figura 4.6 Diagrama esquemático de la función objetivo.

$$Euclidea = \sqrt{\sum_{t=0}^{t=t_{\max}} (C_{m_est}(t) - C_{m_TGA}(t))^2} \quad 4.5$$

4.3.3 Función de optimización por algoritmos genéticos

Para la función de optimización por algoritmos genéticos se usó la función GA, incluida en el Toolbox de algoritmos genéticos de *Matlab*. GA es una función que permite resolver problemas de optimización que involucran restricciones tanto de tipo lineal como no lineal de la forma:

$$\min F(X) \quad \text{sujeto a:} \quad \begin{cases} A \cdot X \leq B & (\text{restricciones lineales}) \\ C(X) \leq 0 & (\text{restricciones no lineales}) \\ X_{\min} \leq X \leq X_{\max} & (\text{rango de búsqueda de } X) \end{cases} \quad 4.6$$

donde:

- X : Vector de variables independientes
 $F(X)$: Función objetivo
 A : Matriz de coeficientes de restricciones de igualdad
 B : Vector de valores independientes de las restricciones de igualdad
 $C(X)$: Matriz de restricciones de desigualdad
 X_{\min} : Límite inferior para los valores del vector X
 X_{\max} : Límite superior para los valores del vector X

La Figura 4.7 muestra la secuencia de operación de la función de optimización por algoritmos genéticos.

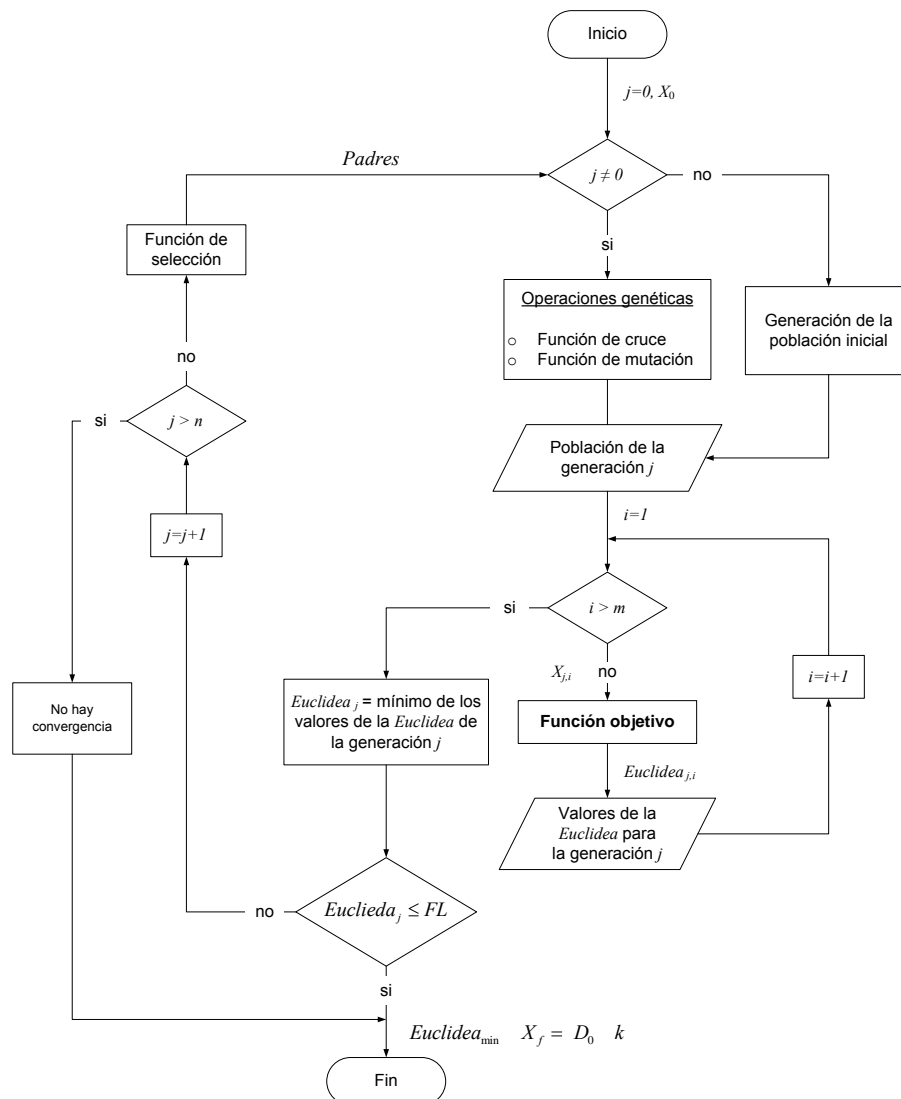


Figura 4.7 Diagrama de flujo de la función de optimización por algoritmos genéticos.

donde:

- n : Número de generaciones
- m : Tamaño de la población
- X : Vector de variables independientes (k y D_0)
- X_0 : Vector inicial de variables independientes
- $X_{j,i}$: Vector de variables independientes para el individuo i de la población j
- FL : Valor objetivo (Fitness limit)
- X_f : Vector solución que contiene los valores de k y D_0 con los cuales se obtiene el valor de $Euclidean_{\min}$.
- $Euclidean_{j,i}$: Valor de la distancia euclidiana obtenido al ser evaluada la función objetivo con los datos del vector $X_{i,j}$
- $Euclidean_j$: Mínimo valor de los m datos de distancia euclidiana de la población j
- $Euclidean_{\min}$: Mínimo valor de la distancia euclidiana para las generaciones evaluadas

La secuencia de operación del proceso de optimización es la siguiente:

- A partir de los valores iniciales de k y D_0 contenidos en el vector X_0 , la función GA genera de manera aleatoria la población inicial (generación $j=0$).
- La función objetivo es evaluada con cada uno de los m vectores $X_{i,j}$ que compone la población, obteniendo los correspondientes valores de distancia euclidiana ($Euclidean_{j,i}$).
- Una vez encontrados todos los valores de distancia euclidiana para la población de la generación j , se determina el mínimo de estos valores ($Euclidean_j$), y se compara con el valor objetivo FL .
- Si se cumple que $Euclidean_j \leq FL$, entonces $Euclidean_{\min} = Euclidean_j$ y el proceso de optimización finaliza, entregando como resultado el vector X_f que contiene los valores de k y D_0 con los que se obtiene el mínimo valor de distancia euclidiana.

- Si por el contrario $Euclidea_j > FL$, la función GA realiza el proceso de selección para encontrar los individuos supervivientes (padres), que son aquellos individuos con los que se obtuvieron los menores valores de distancia euclidiana. Por defecto el número de individuos que sobreviven de una generación a otra es de 2. Una vez determinados los padres, la función GA aplica sobre estos las operaciones genéticas de cruce y mutación para generar una nueva población.
- El proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de distancia euclidiana menor al valor objetivo o hasta que se agote el número de generaciones (n), preestablecido.

4.4 Estudio experimental

La metodología presentada en los apartados 4.1 a 4.3, se aplicó en la determinación del coeficiente de difusión de humedad de papel aislante de transformador no impregnado de aceite.

Para determinar la dependencia del coeficiente de difusión respecto de la temperatura, la concentración de humedad y el espesor, se aplicó el procedimiento de optimización a la función objetivo. Como entrada de la función objetivo se emplearon curvas de secado obtenidas experimentalmente sobre muestras de aislamiento de papel de diferente espesor (2 mm, 3 mm, 4 mm y 5 mm), y a diferentes temperaturas (40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C).

En la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad se emplearon 40 curvas de secado, ya que el experimento se realizó dos veces para cada combinación de espesor del aislamiento y temperatura del secado.

A continuación se describe el estudio experimental realizado, incluyendo la preparación de las muestras y la obtención de las curvas de secado usadas en la determinación del coeficiente de difusión de humedad de papeles Kraft sin impregnar.

4.4.1 Preparación de las muestras

Durante el presente estudio experimental se ensayaron muestras de papel Kraft de 1 mm, 2 mm, 3 mm y 5 mm de espesor. Para lograr el espesor requerido de cada

una de las muestras, se apilaron capas de papel Kraft previamente humedecidas, de 0,1 mm de espesor y con forma circular de 6 mm de diámetro.

El rango de humedad de interés en el caso de secado de aislamientos de transformador está entre 0% y 6%, sin embargo es necesario un valor de humedad previo en el papel superior al 6%, para tener en cuenta la pérdida de humedad que ocurre antes del secado y durante la preparación de las muestras. Además es necesario descartar los primeros datos obtenidos en el TGA que corresponden principalmente al periodo de precalentamiento de la muestra y a la desorción de humedad por evaporación en la superficie de la muestra.

Para preparar las muestras de papel con los valores deseados de humedad inicial, se introdujeron hojas de papel Kraft en una cámara climática a una temperatura de 30 °C y con una humedad relativa de 67,5%.

De acuerdo con las curvas de Jeffries (Figura 4.8), que relacionan la humedad de equilibrio en el papel con la humedad relativa del aire para distintas condiciones de temperatura, la humedad esperada en el papel con estas condiciones ambientales debería ser cercana al 8%. Después del proceso de humectación, las muestras fueron analizadas en el laboratorio mediante el método Karl Fishcher para determinar la humedad al comienzo de los experimentos de secado. En la práctica el mayor valor de humedad obtenido fue de un 7,5%.

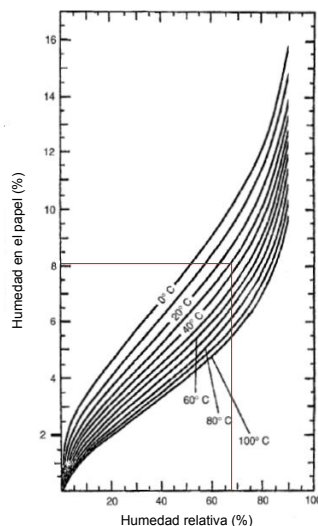


Figura 4.8 Curvas de equilibrio de humedad en papeles expuestos al aire (curvas de Jeffries) tomadas de [26] y modificada. En abscisas aparece la humedad relativa del aire, en las ordenadas la humedad del papel.

El tiempo de permanencia de las hojas de papel en la cámara climática es un parámetro importante, ya que con un tiempo suficiente se garantiza que las muestras alcancen la humedad de equilibrio y que la humectación sea homogénea. Este tiempo se determinó tomando como referencia los datos mostrados por Gasser en [38], para humectación de cartones prensados de alta densidad. La Figura 4.9 muestra la evolución de la humedad en muestras de cartón de diferentes espesores. Puede observarse cómo la muestra de cartón de 1 mm de espesor, al cabo de dos días, prácticamente ha alcanzado la humedad de equilibrio. Teniendo en cuenta estos datos, se dedujo que para las hojas de papel, de menor espesor y menor densidad que el cartón, un tiempo mínimo de 48 horas es un tiempo razonable de permanencia en la cámara climática antes de ser sometidas a los experimentos de secado.

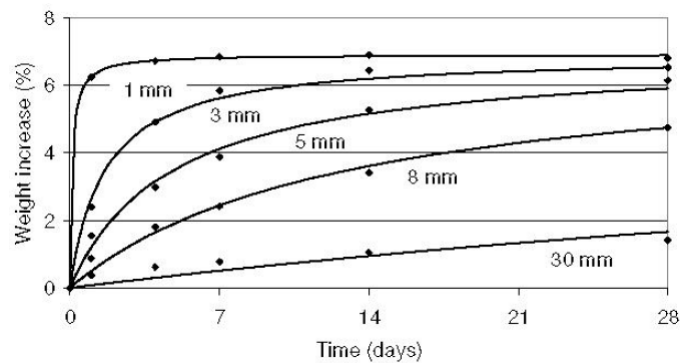


Figura 4.9 Absorción de agua en cartones prensados de alta densidad a 23 °C y 50% de humedad relativa del aire. Los puntos corresponden a los valores medidos y las líneas a sus respectivas curvas de ajuste. Tomado de [38].

4.4.2 Obtención de las curvas de secado

Tal y como se ha comentado anteriormente, se obtuvieron curvas de secado para muestras de aislamiento de papel Kraft de distintos espesores. Las muestras se introdujeron en los recipientes de PTFE mostrados en la Figura 4.10, que únicamente tienen una abertura en su parte superior. Como se puede ver en la figura, se construyeron recipientes de distintas alturas con el fin de facilitar el apilamiento de las capas de papel hasta lograr los espesores deseados. Estos recipientes solo permiten pérdida de humedad por su parte superior, teniendo, de este modo, difusión en una sola dirección tal y como ocurre durante el proceso de desorción de humedad en el aislamiento de un transformador.

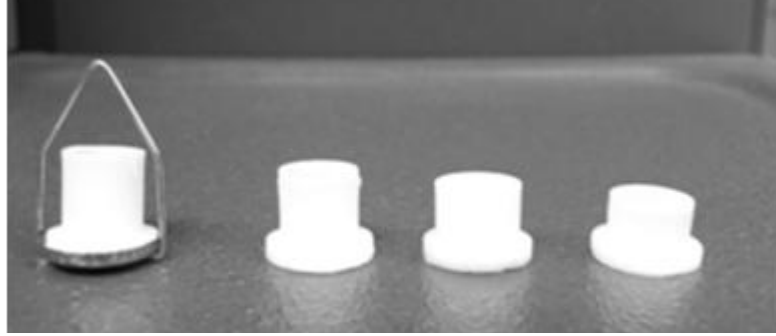


Figura 4.10 Recipientes de PTFE empleados en el secado de las muestras de papel en el TGA.

Las muestras de papel introducidas en los recipientes de PTFE, se sometieron a secado en el TGA, empleando una temperatura constante (ciclo isotérmico). Los primeros minutos del secado se descartaron por varias razones. Por una parte el horno del TGA tarda un cierto tiempo en alcanzar la temperatura de consigna.

Además se observó que, durante los primeros instantes del secado, las medidas que se obtienen con el TGA muestran un incremento en el peso de la muestra que no resulta lógico (Figura 4.11). Este efecto se puede atribuir a un transitorio en el establecimiento de la medida de peso por parte del TGA. Durante los experimentos se observó además que el pico en la variación del peso se acrecentaba conforme la rampa de aumento de temperatura aplicada era mayor.

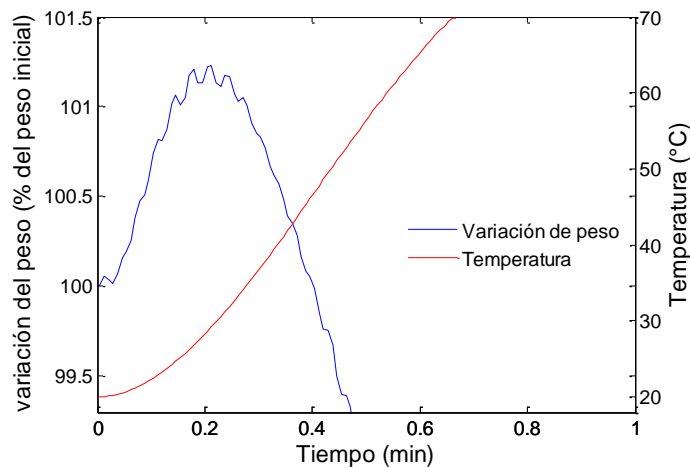


Figura 4.11 Primeros instantes del secado en el TGA de una muestra de 3mm de espesor con consigna de temperatura de 80 °C.

Un tercer motivo para descartar los primeros minutos del secado, es que el fenómeno predominante en el secado en estos instantes es la evaporación de la

humedad superficial y no la evaporación de la humedad proveniente del interior del papel, que corresponde al fenómeno de difusión.

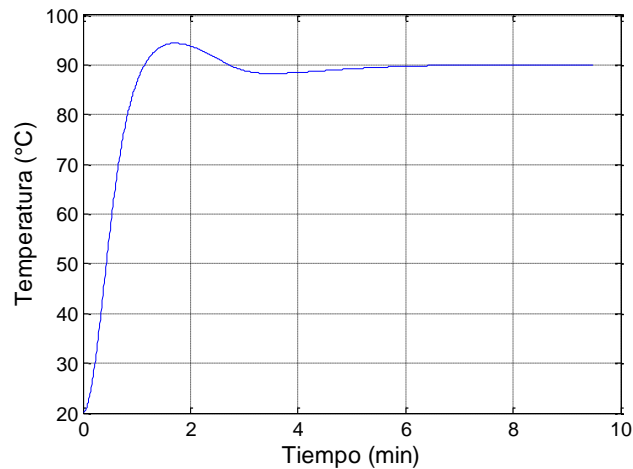


Figura 4.12 Incremento de temperatura en el TGA, para una rampa de crecimiento tipo escalón y temperatura de consigna de 90 °C.

Un aspecto que se debe ajustar en el experimento TGA, es el modo de alcanzar la temperatura de consigna. Se observó que si la rampa seleccionada tiene una pendiente muy grande, se producía una sobre oscilación significativa en la temperatura al alcanzar el valor de consigna (Figura 4.12). Para disminuir la incidencia de dicha sobre oscilación, y también del pico de peso mencionado anteriormente, durante la obtención de las curvas de secado se aplicó una doble rampa para alcanzar las temperaturas de consigna. La Tabla 4.1 resume los ajustes de temperatura usados en la obtención de las curvas de secado.

Tabla 4.1 Ajustes de temperatura usados en los experimentos de secado en el TGA.

Temperatura de consigna (°C)	Rampa 1		Rampa 2	
	Incremento (°C/min)	Valor final (°C)	Incremento (°C/min)	Valor final (°C)
40	15	35	5	40
50	15	45	5	50
60	15	55	5	60
70	20	65	5	70
80	20	75	5	80

El tiempo total empleado para alcanzar la temperatura de consigna varía dependiendo de la temperatura inicial del horno del TGA. Por ejemplo, para una temperatura inicial del horno de 20 °C, y una temperatura de consigna de 60 °C, el

tiempo requerido es 3,3 minutos, mientras que para alcanzar una temperatura de consigna de 80 °C se necesitarían 4 minutos.

La Figura 4.13 muestra las curvas de secado obtenidas sobre muestras de papel de 3 mm de espesor para diferentes temperaturas de secado. Se puede apreciar cómo la desorción de humedad es más lenta a medida que la temperatura disminuye.

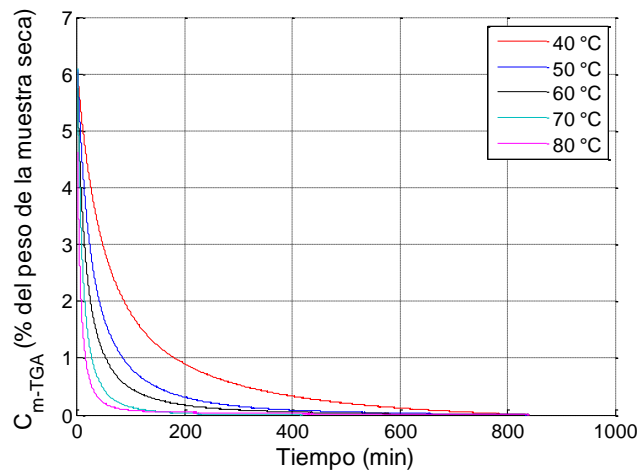


Figura 4.13 Curvas de secado a diferentes temperaturas, para muestras de papel de 3 mm de espesor.

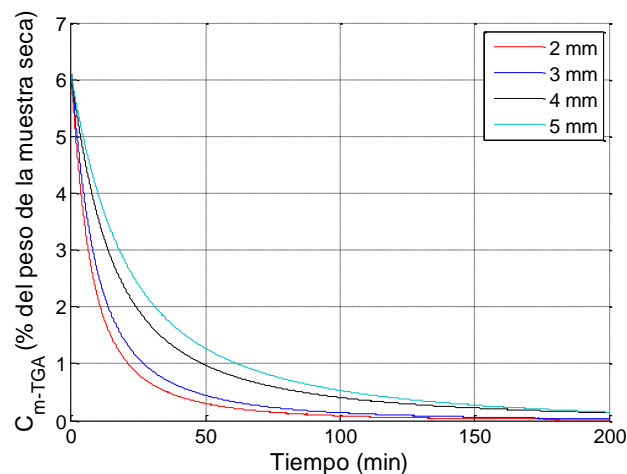


Figura 4.14 Curvas de secado a 70 °C, para muestras de papel de diferente espesor.

La Figura 4.14 muestra las curvas de secado a 70 °C para muestras de distinto espesor. Se puede apreciar cómo a medida que el espesor disminuye la desorción de humedad de la muestra es más rápida. En el Apéndice B se presentan las curvas de secado obtenidas mediante los experimentos en el TGA y que fueron usadas

posteriormente en la determinación del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos de papel sin impregnar de aceite.

4.5 Estimación del coeficiente de difusión de humedad para papeles sin impregnar

Se aplicó el proceso de optimización descrito en el apartado 4.3 a las 40 curvas de secado, obteniendo con ello los valores de los parámetros D_0 y k de la expresión del coeficiente de difusión. A continuación se expone la aplicación del proceso de optimización y el análisis de los resultados; mostrando la correlación existente entre los valores de D_0 y k obtenidos, y las variables independientes, como son la temperatura y espesor de la muestra.

4.5.1 Aplicación del proceso de optimización a las curvas experimentales

El proceso de optimización descrito en la Figura 4.7, fue aplicado a las curvas de secado experimental, obtenidas mediante los experimentos en el TGA. Para la utilización de la función de optimización por algoritmos genéticos de *Matlab* (GA), es necesario ajustar algunos de los parámetros como el tipo de función de cruce y mutación, el tamaño de la población, el número de generaciones, y el valor objetivo entre otras. Los principales ajustes realizados a la función de optimización se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Ajuste de los parámetros de la función GA

Parámetro	Valor de ajuste
Tamaño de la población	1000
Número de generaciones	10
Función para generar la población inicial	Aleatoria uniforme (@gacreationuniform)
Función de cruce	De dos puntos (@crossovertwopoint)
Función de mutación	Adaptable (@mutationadaptfeasible)
Función de selección	Estocástica uniforme (@selectionstochunif)
Valor objetivo (FL)	2
Valor inicial de k	0,22
Valor inicial de D_0	5E-10
Rango de búsqueda del valor de k	[0,1]
Rango de búsqueda del valor D_0	[1E-11, 1E-8]

El tamaño de la población y el número de generaciones usados en los ajustes se determinaron después de medir, para distintas combinaciones de sus valores, los tiempos requeridos por la función de optimización para alcanzar el valor objetivo. La función de selección usada es la disponible por defecto en la función GA de *Matlab*. Las funciones de cruce y mutación escogidas son las habitualmente usadas en problemas de optimización.

El seleccionar un valor objetivo para la distancia Euclidiana diferente de cero implica que los valores de k y D_0 obtenidos en cada caso no logran una concordancia plena entre la curva de secado experimental y la curva de secado estimada como ocurriría en el caso ideal. El valor de 2, elegido como valor objetivo, es un compromiso que garantiza unos resultados suficientemente precisos, con unos tiempos de cálculo razonables. Aun cuando se fijara un valor objetivo igual a cero, sería difícil obtener una concordancia plena entre la curva experimental y la real ya que siempre existe una incertidumbre asociada a la propia obtención de las curvas de secado experimentales.

Las curvas mostradas en la Figura 4.15 corresponden al secado isotérmico a 70 °C de una muestra de papel de 4 mm de espesor. C_{m-TGA} es la curva de secado calculada a partir de los datos experimentales del TGA y C_{m-est} es la curva estimada con el modelo de secado MEF. La curva estimada se ha obtenido al emplear los valores de $k=0,314$ y $D_0=8,9345 \times 10^{-10}$ conseguidos previamente mediante el proceso de optimización. El valor de la distancia euclidiana en este caso es 1,4257.

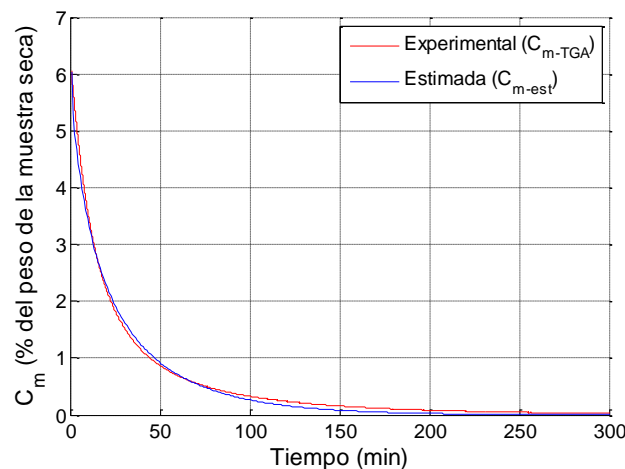


Figura 4.15 Curvas de secado experimental y estimada para una muestra de papel de 4 mm de espesor secada a una temperatura de 70 °C.

La función empleada para generar la población inicial, crea una población inicial distinta cada vez que es invocada, ya que el algoritmo genético usa los denominados generadores de números aleatorios uniforme (*rand*) y normal (*randn*) de *Matlab* [78].

Para dotar de aleatoriedad la búsqueda del algoritmo genético, reduciendo la posibilidad de que el resultado de la optimización corresponda con un mínimo local del espacio solución, el proceso de optimización debe repetirse varias veces sobre cada conjunto de datos experimentales, y posteriormente realizar un análisis estadístico a los datos resultantes. Para reducir aún más la posibilidad de sesgos durante la búsqueda en los distintos procesos de optimización, para cada curva de secado experimental se usaron hasta cuatro ordenadores diferentes. Asimismo el orden en que se escogía la curva de secado para la optimización en cada ordenador, también se hizo de forma aleatoria.

Sobre las 40 curvas de secado obtenidas experimentalmente se aplicó 577 veces el proceso de optimización. Del total de valores de k y D_0 obtenidos, se descartaron 14 valores, correspondientes a aquellos procesos de optimización en los no se logró convergencia o que diferían significativamente de los encontrados para unas condiciones de secado similares (valores atípicos). El número total de valores considerados válidos para la estimación del coeficiente de difusión fue de 563 y se muestran en forma de coordenadas en la Figura 4.16.

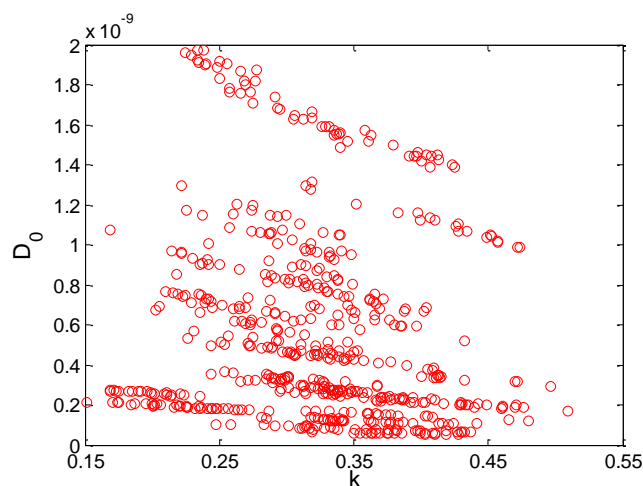


Figura 4.16 Valores de D_0 y k resultantes del proceso de optimización.

La Figura 4.17 muestra cuantas veces fue aplicado el proceso de optimización, en función de la temperatura de secado y del espesor de la muestra de papel.

El tiempo computacional requerido para completar un proceso de optimización estuvo comprendido entre 33,9 y 1 031,5 minutos, y el tiempo total empleado para finalizar el estudio completo fue de 87 812 minutos (60,98 días).

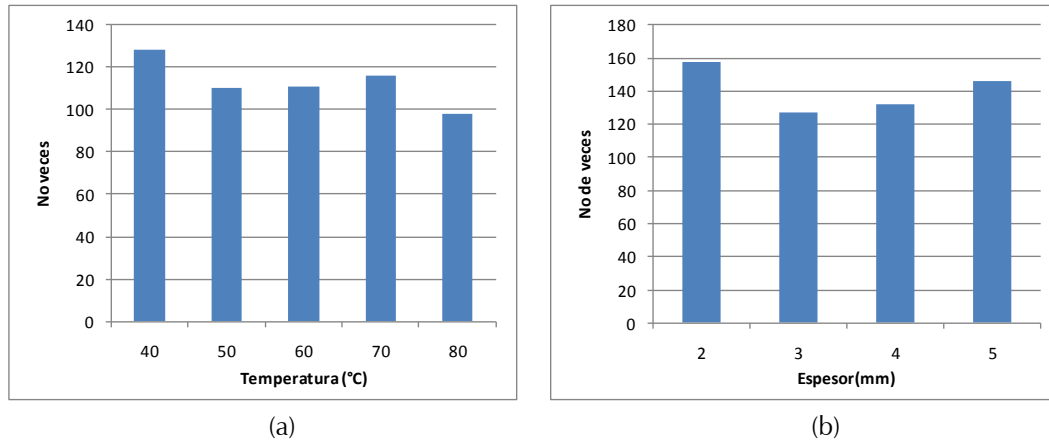


Figura 4.17 Número de veces que se aplicó el proceso de optimización en función de: (a) la temperatura de secado y (b) el espesor de la muestra.

A continuación se presenta el análisis realizado para correlacionar la dependencia de los parámetros k y D_0 , obtenidos mediante el procedimiento de optimización, respecto de la temperatura y el espesor de la muestra de papel.

4.5.2 Análisis de resultados para el parámetro k

Las dos gráficas siguientes presentan los 563 datos de k obtenidos a partir del proceso de optimización. La Figura 4.18 muestra los diferentes valores del parámetro k , en función de la temperatura del secado, para los diferentes espesores de papel evaluados. La Figura 4.19 muestra los valores del parámetro k en función del espesor de la muestra de papel, para las distintas temperaturas de secado. En el Apéndice C se muestran las gráficas de k frente a temperatura para cada uno de los espesores de aislamiento evaluados.

Como se puede ver, en ambas figuras aparece una dispersión importante del valor del parámetro k . Esta dispersión puede explicarse por dos razones: la primera es que el método de optimización está basado en una búsqueda heurística, es decir es un método de tipo estocástico, por lo tanto se puede considerar como un método aproximado. La segunda razón es que en el proceso de optimización se emplea un valor objetivo de 2. Esto significa que el proceso de búsqueda de k , se detiene una vez se cumple que el mínimo valor de la distancia euclidiana es inferior a 2,

independientemente de que se pueda o no hallar un valor mejor del parámetro k si la búsqueda continuara. Como se explicó anteriormente este criterio se adoptó para reducir los tiempos de cálculo requeridos en el proceso de optimización.

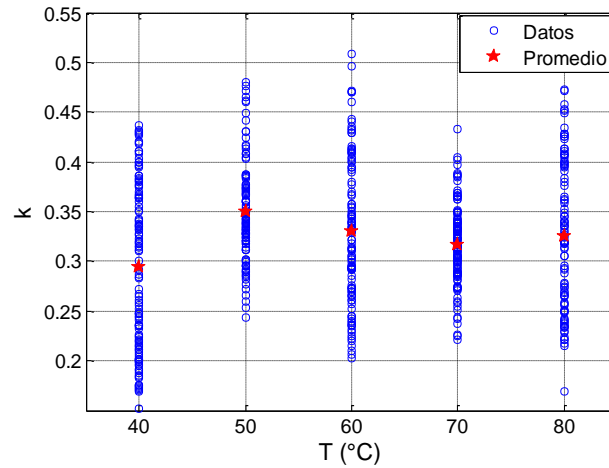


Figura 4.18 Valores del parámetro k en función de la temperatura del aislamiento.

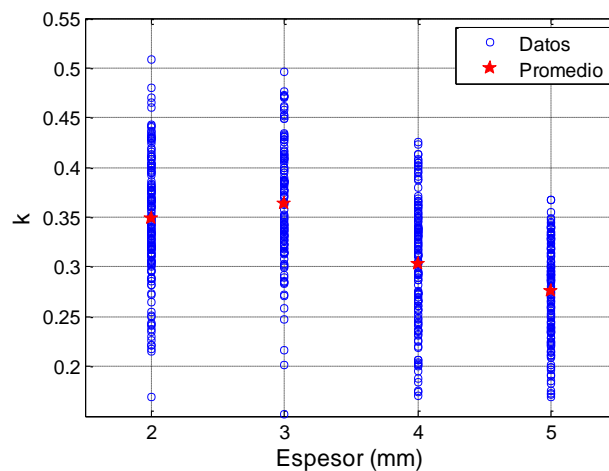


Figura 4.19 Valores del parámetro k en función del espesor del aislamiento.

Debido a la dispersión en los valores de k , obtenidos con el proceso de optimización, no es posible, a partir de los datos de las gráficas anteriores, observar algún patrón específico de variación del parámetro k , ni respecto a la temperatura ni respecto al espesor. Al analizar los valores promedio de k respecto a cada temperatura o espesor evaluados, se aprecia una variación pequeña en sus valores por tanto podría decirse que el valor que toma el parámetro k es independiente tanto de la temperatura como del espesor. Este resultado es coherente con lo expresado por otros autores como Guidi [40] o Foss [34], que consideraron este parámetro constante.

Para saber si existe un único valor del parámetro k que sea representativo de todos los valores obtenidos de los procesos de optimización, es necesario realizar un análisis estadístico y determinar si existe algún tipo de tendencia central entre sus valores. La Figura 4.20 muestra el diagrama de dispersión y el histograma para los 563 datos de k , obtenidos al realizar el análisis mediante el software estadístico Statgraphics®.

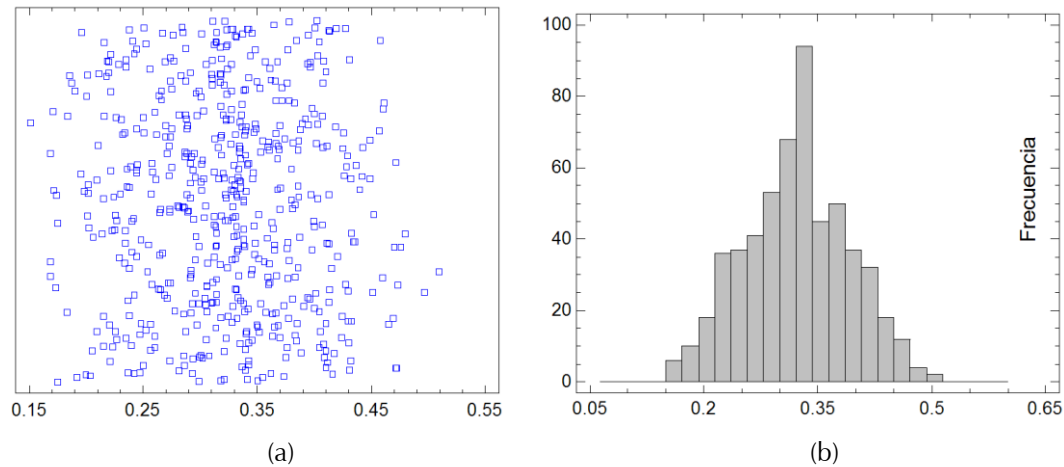


Figura 4.20 Parámetro k (a) gráfico de dispersión, (b) histograma.

Del histograma se advierte una clara tendencia centralizada. Este comportamiento puede corroborarse también en la gráfica de probabilidad normal mostrada en la Figura 4.21.

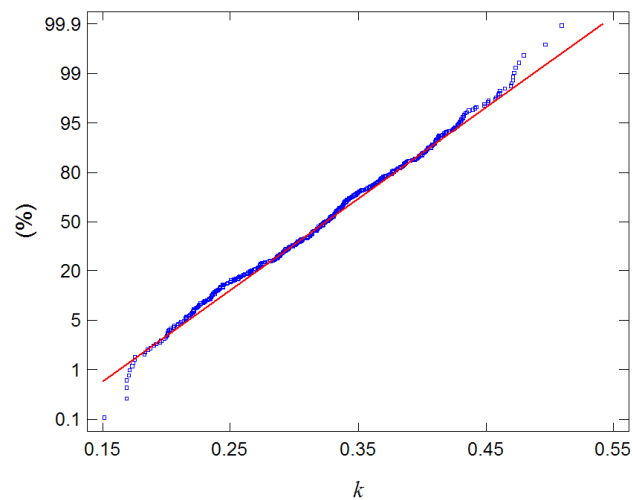


Figura 4.21 Gráfica de probabilidad normal de k .

La Tabla 4.3 muestra el resumen del análisis estadístico realizado sobre los valores del parámetro k mostrados en la Figura 4.20 (a). Esta tabla incluye medidas de

tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal.

Tabla 4.3 Resumen estadístico de k

Parámetro	Valor
Recuento (Nº datos)	563
Media (\bar{k})	0,32232
Mediana (M_e)	0,32458
Desviación Estándar (σ)	0,06876
Coeficiente de Variación	21,33%
Mínimo (k_{\min})	0,15143
Máximo (k_{\max})	0,50900
Rango	0,35757
Sesgo Estandarizado	-0,17967
Curtosis Estandarizada	-2,00056

En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal, y el valor de curtosis estandarizada, a pesar de que no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal (-2 a 2), sí es muy cercana a su valor límite. Por lo tanto se puede considerar que la muestra de datos de k proveniente de una distribución normal, con una tendencia de tipo central, y con valores de media y mediana cercanos.

Debido a la alta dispersión de los datos, como valor representativo del parámetro k es más conveniente escoger la mediana (M_e), ya que ésta es una medida de tendencia central más robusta que la media (\bar{k}). Esto se puede explicar porque la mediana tiene un punto de quiebre de 50%, mientras que el promedio tiene un punto de quiebre de 0%, lo que significa que un único dato de medición muy grande o muy pequeño, entre todos los datos evaluados, puede alterar significativamente su valor. Por lo tanto como valor del parámetro k se tomará la mediana de los 563 datos obtenidos durante el presente estudio (ecuación 4.7).

$$k = 0,32458$$

4.7

4.5.3 Análisis de resultados para el parámetro D_0

La Figura 4.22 muestra los 563 valores obtenidos para el parámetro D_0 en función de la temperatura, y la Figura 4.23 los mismos datos en función del espesor. Al igual que en el caso del parámetro k , también se observa gran dispersión en los valores. Esta dispersión se debe a los motivos explicados anteriormente.

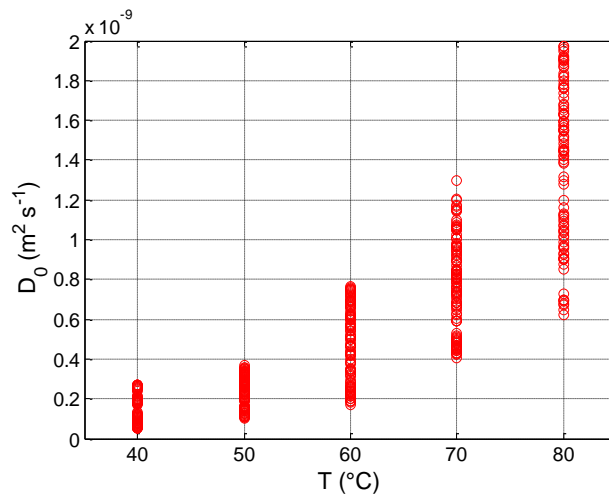


Figura 4.22 Valores de D_0 en función de la temperatura del aislamiento.

De la Figura 4.23 se observa que la dispersión de los datos aumenta a medida que se incrementa la temperatura del papel.

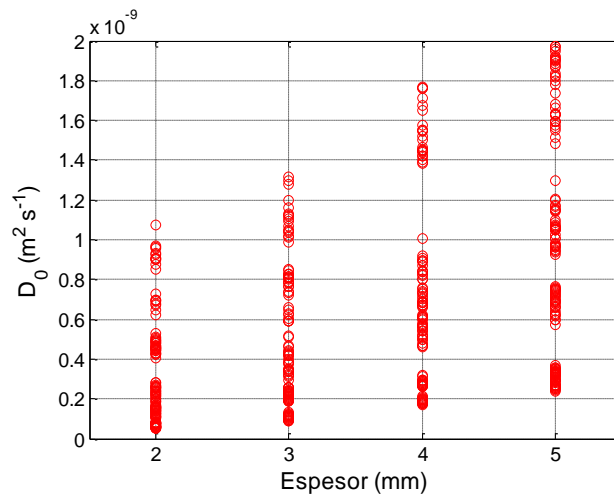


Figura 4.23 Valores de D_0 en función del espesor del aislamiento.

Promediando los datos de D_0 , para cada espesor evaluado, y representando estos datos en función de la temperatura, se obtienen los valores mostrados en la Figura 4.24. Los datos denominados “Promedio” en dicha figura, corresponden al promedio de todos los datos, es decir, sin diferenciar el espesor de la muestra. En el

Apéndice C se muestran las graficas de D_0 frente a la temperatura, con los datos agrupados por espesor.

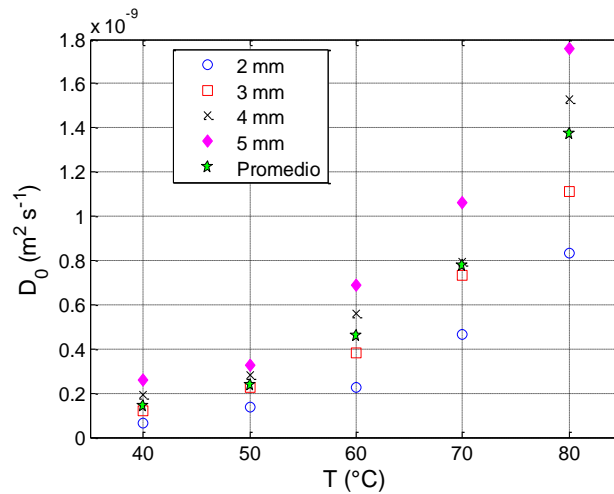


Figura 4.24 Valores promedio de D_0 en función de la temperatura, para los distintos espesores.

En la Figura 4.24 se observa un claro patrón de variación de D_0 con respecto a la temperatura, de forma que su valor aumenta a medida que la temperatura aumenta, lo cual corresponde al comportamiento esperado. También se aprecia que para una misma temperatura, los valores de D_0 son mayores a medida que el espesor de la muestra aumenta, apareciendo una clara dependencia del parámetro D_0 con respecto al espesor del aislamiento.

La dependencia del coeficiente de difusión con respecto al espesor no ha sido reportada por otros autores en trabajos sobre determinación de coeficientes de difusión de humedad de aislamientos celulósicos, sin embargo sí ha sido encontrada por otros autores en estudios para determinación de coeficientes de difusión en otros materiales higroscópicos como alimentos [31, 50, 57, 77, 86, 111]. El incremento en el valor del coeficiente de difusión de humedad con el aumento del espesor del material sólido, no tiene una explicación aceptada, aunque se menciona como posible causa de este comportamiento al aumento de los poros, las grietas y los canales al interior del material [102, 111].

Para expresar la dependencia de D_0 con respecto a la temperatura, se usó la ecuación 4.8, que es una expresión general que relaciona la dependencia del coeficiente de difusión de humedad de algunos materiales higroscópicos con

respecto a la temperatura [126, 84]. Esta expresión es además similar a la ecuación empírica propuesta por Guidi en [40] y usada por otros autores como Foss [34] y Du [26].

$$D_0 = D_1 \cdot e^{\left(\frac{-D_2}{T_k}\right)} \quad 4.8$$

Los parámetros de la ecuación 4.8, se han obtenido por ajuste de los valores de D_0 mostrados en la Figura 4.24. Para facilitar el ajuste de la ecuación 4.8, se aplica el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación, obteniendo como resultado la ecuación 4.9, que corresponde a la ecuación de una recta de la forma $y = m \cdot x + b$, donde $y = \ln(D_0)$, $m = -D_2$, $x = (1/T_k)$ y $b = \ln(D_1)$.

$$\ln(D_0) = \ln D_1 - \left(\frac{D_2}{T_k}\right) \quad 4.9$$

La Figura 4.25 muestra los valores linealizados de D_0 en función del inverso de la temperatura de prueba expresada en Kelvin ($1/T_k$) y las respectivas curvas de ajuste para cada espesor.

En la Tabla 4.4, se indican los valores absolutos de la pendiente (D_2), el valor de la intersección con el eje de ordenadas ($\ln(D_1)$), y el coeficiente de correlación (R^2), de las curvas de ajuste para cada espesor mostradas en la Figura 4.25. También se muestra el correspondiente valor calculado de D_1 .

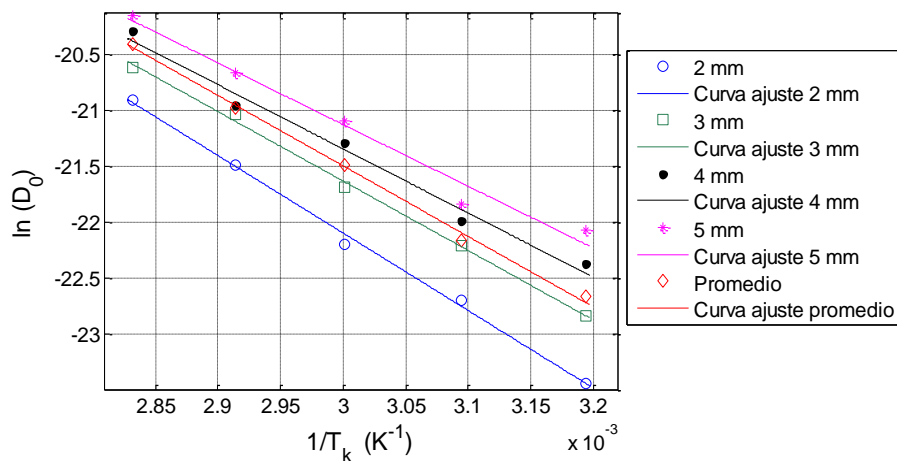


Figura 4.25 Valores linealizados de D_0 en función del espesor y sus respectivas curvas de ajuste.

Tabla 4.4 Coeficientes de ajuste de D_0 para los diferentes espesores de papel

l (mm)	$\ln D_1$	D_2 (K)	D_1 (m ² s ⁻¹)	R^2
2	-1,2783	6939,8	2,7851E-01	0,9969
3	-2,9788	6218,4	5,0854E-02	0,9978
4	-4,1059	5746,3	1,6475E-02	0,9863
5	-4,5552	5524,1	1,0512E-02	0,9775
Curva promedio	-2,5749	6307,5	7,6161E-02	0,9972

Tomando los coeficientes de ajuste correspondientes a la curva promedio, obtenemos una expresión para D_0 , dependiente de la temperatura pero independiente del espesor de la muestra de papel.

$$D_0(T_k) = 7,6161 \times 10^{-2} \cdot e^{\left(\frac{-6307,5}{T_k}\right)} \quad 4.10$$

Para encontrar la dependencia de D_1 y D_2 con el espesor de la muestra de papel, se puede realizar un ajuste por regresión de los valores de la Tabla 4.4, para los diferentes espesores evaluados. La Figura 4.26 y la Figura 4.27 muestran los valores de D_1 y D_2 obtenidos y sus curvas de ajuste correspondientes.

Las ecuaciones 4.11 y 4.12 son las expresiones de las curvas de ajuste encontradas para D_1 y D_2 .

$$D_1 = 3,1786 \cdot l^{-3,665} \quad 4.11$$

$$D_2 = 8241,76 \cdot l^{-0,254} \quad 4.12$$

Introduciendo las expresiones de D_1 y D_2 en la ecuación 4.8, obtenemos la ecuación 4.13, que corresponde al parámetro pre-exponencial del coeficiente de difusión de humedad, en función de la temperatura y el espesor de la muestra de papel.

$$D_0(T_k, l) = 3,1786 \cdot l^{-3,665} \cdot e^{\left(\frac{-8241,76 \cdot l^{-0,254}}{T_k}\right)} \quad 4.13$$

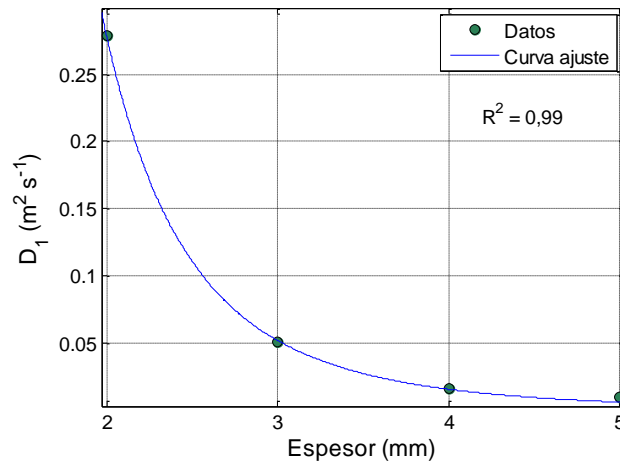


Figura 4.26 Valores de D_1 en función del espesor y su curva de ajuste.

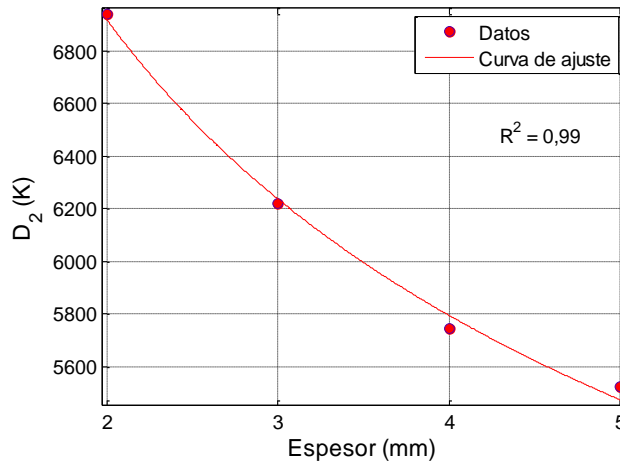


Figura 4.27 Valores de D_2 en función del espesor y su curva de ajuste.

4.5.4 Coeficiente de difusión de humedad en papel Kraft no impregnado

Como se mencionó anteriormente, la ecuación 4.14 es una expresión general para el coeficiente de difusión de humedad en materiales higroscópicos como el papel. Introduciendo los parámetros D_0 y k determinados mediante el proceso de optimización por algoritmos genéticos, se puede obtener la expresión del coeficiente de difusión de humedad del papel Kraft no impregnado.

$$D(c, T) = D_0 \cdot e^{k \cdot c} \quad 4.14$$

Como se indicó en la sección 4.5.2, el valor de k usado, corresponde a la mediana de los datos hallados mediante el proceso de optimización ($k = 0,32458$).

En el caso de D_0 puede emplearse la expresión 4.10 o la expresión 4.13, dependiendo si se quiere obviar o por el contrario, tener en cuenta la dependencia respecto del espesor del aislamiento.

La ecuación 4.15 es la expresión para el cálculo del coeficiente de difusión en función de la concentración local de humedad y la temperatura. La ecuación 4.16 considera además la dependencia respecto al espesor del aislamiento.

$$D(c, T_k) = 7,6161 \times 10^{-2} \cdot e^{\left(0,32458 \cdot c - \frac{6307,5}{T_k}\right)} \quad 4.15$$

$$D(c, T_k, l) = 3,1786 \cdot l^{-3,665} \cdot e^{\left(0,32458 \cdot c - \frac{8241,76 \cdot l^{-0,254}}{T_k}\right)} \quad 4.16$$

4.6 Validación de los coeficientes de difusión propuestos

Para validar las expresiones propuestas del coeficiente de difusión de humedad, se simularon las curvas de secado obtenidas experimentalmente bajo temperatura constante considerando el coeficiente de difusión propuesto en este trabajo.

Adicionalmente, se realizaron simulaciones de estas mismas curvas considerando la expresión del coeficiente de difusión de humedad propuesta por Foss [34], para papeles no impregnados.

En todos los casos se calcularon las distancias euclidianas, lo que permitió comparar los resultados obtenidos al emplear los distintos coeficientes. Finalmente se probaron los coeficientes de difusión de humedad propuestos, empleando nuevas curvas de secado obtenidas experimentalmente bajo temperatura de secado variable.

4.6.1 Validación del coeficiente de difusión con curvas de secado isotérmico

Como se ha indicado, en primer lugar se procedió a validar los coeficientes propuestos en condiciones de temperatura constante. Para ello se obtuvieron las curvas de secado estimadas, mediante el modelo de simulación de secado por elementos finitos, para todas las condiciones de secado evaluadas (temperatura y espesor del aislamiento). Se realizaron simulaciones empleando las dos ecuaciones del coeficiente de difusión de humedad propuestas (ecuación 4.15 para el coeficiente de difusión independiente del espesor de la muestra de papel y ecuación 4.16 para el coeficiente de difusión dependiente del espesor de la muestra de papel).

Adicionalmente, en cada caso, se obtuvo la curva estimada simulando el secado con el coeficiente de difusión de humedad para papeles no impregnados propuesto por Foss (ecuación 4.17).

$$D_{Foss}(c, T_k) = 2,62 \times 10^{-11} \cdot e^{\left[0,5 \cdot c + 8140 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_k}\right)\right]} \quad 4.17$$

La Figura 4.28 presenta uno de los casos simulados y en la Tabla 4.5 se presentan los resultados numéricos obtenidos.

Como se aprecia de los resultados de la Tabla 4.5, en la mayoría de los casos los mejores resultados de simulación se obtienen al emplear el coeficiente de difusión de humedad dependiente del espesor propuesto en esta tesis (la distancia euclidiana es menor que cuando se emplean los otros dos coeficientes). Asimismo las distancias euclidianas obtenidas al emplear el coeficiente de Foss suelen ser las mayores aunque en algunos de los casos evaluados, al usar el coeficiente de difusión propuesto que no considera la dependencia del espesor, el valor de distancia euclidiana es parecido al valor obtenido con el coeficiente de Foss.

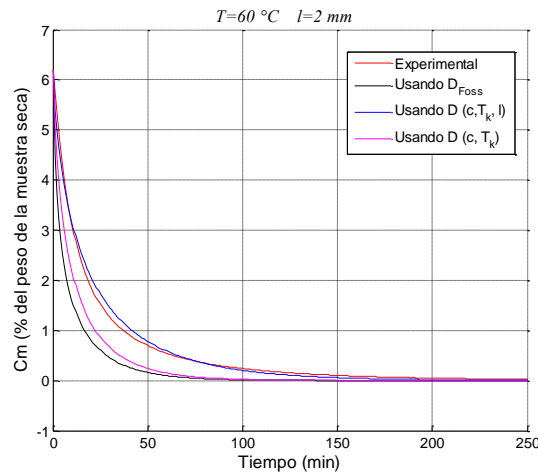


Figura 4.28 Curvas de secado estimadas con diferentes expresiones del coeficiente de difusión de humedad. Temperatura 60 °C, espesor de la muestra de papel de 2 mm.

Tabla 4.5 Distancia Euclidiana para las curvas de secado al emplear diferentes expresiones del coeficiente de difusión de humedad.

Temperatura (°C)	l (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D_{Foss}(c, T_k)$	$D(c, T_k, l)$	$D(c, T_k)$	
		Ecu. 4.17	Ecu. 4.16	Ecu. 4.15	
40	2	13,15	1,94	13,60	
		9,41	4,74	9,49	
	3	3,74	2,07	3,04	
		10,55	8,99	10,46	
	4	7,28	4,35	5,43	
		6,88	4,44	5,04	
	5	14,45	4,11	14,36	
		14,43	4,06	14,36	
	50	2	7,25	4,11	5,51
			10,59	1,80	8,87
3		3,44	2,30	2,24	
		3,52	2,31	1,85	
4		3,64	3,51	2,91	
		3,43	3,01	3,17	
5		4,01	4,37	6,54	
		4,01	5,98	4,94	
60		2	8,23	1,38	5,68
			8,67	1,90	6,29
	3	4,19	1,55	1,29	
		5,34	2,05	2,46	
	4	4,86	2,37	1,71	
		4,19	1,74	3,46	
	5	3,51	1,70	6,23	
		2,86	1,36	5,93	
	70	2	6,97	1,12	4,33
			7,09	1,07	4,43
3		6,17	2,07	2,52	
		4,66	1,40	1,22	
4		5,00	1,58	1,75	
		6,20	2,72	1,84	
5		3,67	1,67	4,73	
		4,67	1,60	3,34	
80		2	5,88	1,13	3,29
			6,59	2,07	4,20
	3	3,67	0,87	0,88	
		3,66	1,17	1,23	
	4	3,21	1,53	2,13	
		3,66	1,22	1,87	
	5	5,08	1,45	2,59	
		5,00	1,35	2,74	

4.6.2 Validación del coeficiente de difusión con curvas de secado a temperatura variable.

Los coeficientes de difusión de humedad propuestos también fueron evaluados con curvas de secado experimentales obtenidas a temperatura variable. Para obtener una mejor resolución en la estimación de las curvas de secado durante el transitorio

térmico, se resolvió el modelo de simulación de elementos finitos empleando un escalado temporal de segundos y no de minutos como se había hecho hasta el momento.

Se realizaron dos ensayos a temperatura variable. En el primero de ellos se aplicó el perfil de temperatura mostrado en la Figura 4.29 a una muestra de papel de 2 mm de espesor. La Figura 4.30 muestra la curva de secado medida, y las estimadas empleando los dos coeficientes de difusión propuestos, como el coeficiente propuesto por Foss.

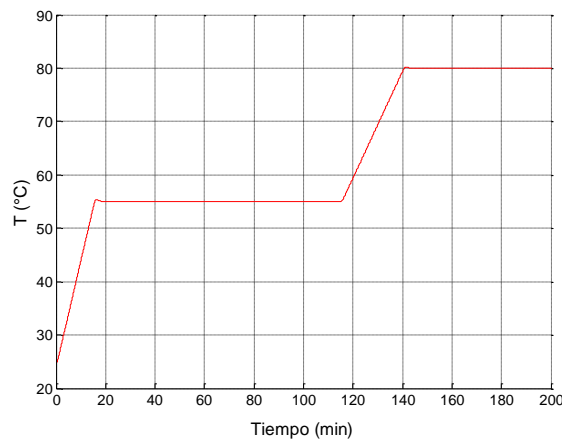


Figura 4.29 Perfil de temperatura usado en el secado de una muestra de papel de 2 mm de espesor.

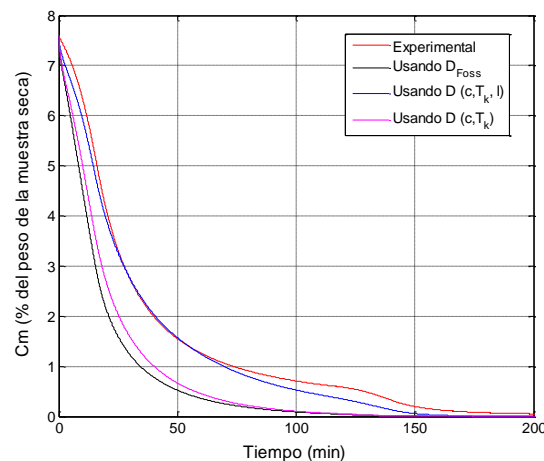


Figura 4.30 Concentración media de humedad de una muestra de papel de 2 mm de espesor, secada con el perfil de temperatura de la Figura 4.29.

También se realizó un ensayo sobre una muestra de papel de 3 mm de espesor sometida al perfil de temperatura mostrado en la Figura 4.31. En la Figura 4.32 se

muestran los resultados obtenidos al emplear los distintos coeficientes y en la Tabla 4.6 se muestran los valores de distancia euclidiana para las distintas simulaciones.

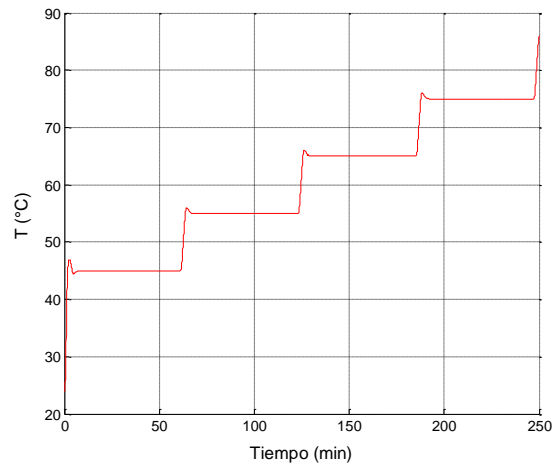


Figura 4.31 Perfil de temperatura usado en el secado de una muestra de papel de 3 mm de espesor.

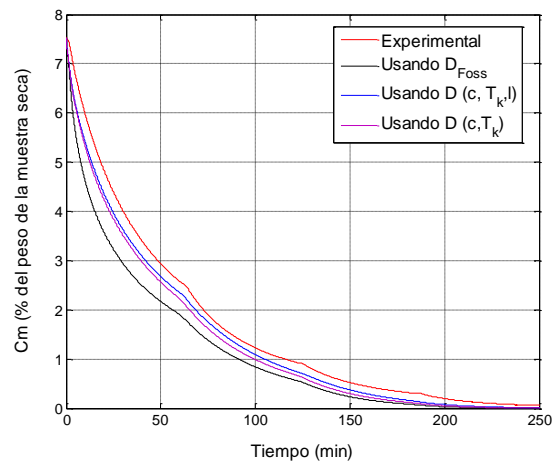


Figura 4.32 Concentración media de humedad de una muestra de papel de 3 mm de espesor, secada con el perfil de temperatura de la Figura 4.31.

Tabla 4.6 Distancia Euclidiana para los casos de validación con temperatura variable

l (mm)	t_{\max} (s)	Distancia Euclidiana		
		$D_{Foss}(c, T_k)$ Ecu. 4.17	$D(c, T_k, l)$ Ecu. 4.16	$D(c, T_k)$ Ecu. 4.15
2	62 393	98,46	19,63	80,09
3	67 858	72,13	31,81	39,75

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 4.6 y las curvas de secado de las Figura 4.30 y Figura 4.32, se observa que las curvas de secado obtenidas al emplear el coeficiente de difusión de humedad que considera la dependencia con el espesor

del aislamiento de papel, tienen mejor concordancia con las curvas de secado experimental y responden mejor a los cambios en la temperatura que las curvas estimadas con los coeficientes de difusión independientes del espesor.

4.7 Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado la metodología seguida y los resultados obtenidos en la determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador del tipo Kraft, no impregnados.

La metodología propuesta para la determinación del coeficiente de difusión de humedad puede dividirse en tres partes: la primera parte es experimental y consiste en hallar bajo distintas condiciones de temperatura y espesor de la muestra, las curvas de secado del material a evaluar. En la segunda parte de la metodología se hallan los parámetros del coeficiente de difusión de humedad, mediante un proceso de optimización basado en algoritmos genéticos y cuya función objetivo incluye el modelo de los experimentos de secado, y la resolución de la ecuación de difusión de humedad en dicho modelo mediante elementos finitos. Finalmente, se realiza un análisis para correlacionar los valores de los parámetros del coeficiente de difusión hallados con las variables de las que dependen, como son, concentración de humedad, temperatura y espesor. Esta última parte se realizó mediante un análisis estadístico y por ajuste de los valores encontrados a formulas empíricas sugeridas en la literatura técnica.

La mayor parte de los autores que han trabajado en la determinación de coeficientes de difusión en aislamientos de transformadores, emplearon técnicas analíticas que precisan disponer de la evolución en el tiempo de los perfiles de concentración de humedad a través del espesor de la muestra. La ventaja principal de la metodología propuesta en esta tesis, es que los experimentos necesarios para determinar los coeficientes de difusión son sencillos, precisos y repetibles. Además requieren de equipos menos costosos y sofisticados que otras metodologías referenciadas en la literatura. Para aplicar la metodología propuesta es necesario medir la evolución de la desorción global de humedad de una muestra en el tiempo (también llamada curva de secado). Esta variable se puede medir mediante experimentos termogravimétricos.

Además, al emplear un modelo de secado por elementos finitos para la solución de la ecuación de difusión, en vez de usar una ecuación aproximada de tipo analítico, se logra mayor precisión en la estimación de la evolución de la desorción de humedad y por tanto mayor precisión en la determinación del coeficiente de difusión de humedad.

Se ha usado la técnica de inteligencia artificial de algoritmos genéticos para el ajuste entre las curvas de secado experimentales y las estimadas, debido a que el proceso de optimización por algoritmos genéticos no precisa que la función objetivo sea derivable como sí ocurre en otras técnicas como por ejemplo Levenberg-Marquardt.

En el proceso de optimización propuesto se aprovecha la fortaleza de los algoritmos genéticos en búsquedas heurísticas, para hallar de manera simple los valores de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad. Sin embargo, dado que esta técnica no es un método determinístico, se debe tener cuidado de dotarla de suficiente aleatoriedad y repetir el proceso de optimización varias veces, para descartar que los valores hallados correspondan a un mínimo local del espacio solución.

Como resultado del trabajo presentado en este capítulo se proponen dos ecuaciones para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad de papeles aislantes de transformador de tipo Kraft, no impregnados de aceite que pueden emplearse por ejemplo en la determinación del tiempo requerido para el secado en fábrica, durante la construcción de los transformadores de potencia.

La primera ecuación del coeficiente de difusión de humedad propuesta es dependiente de la concentración local de humedad y la temperatura de la muestra de papel (ecuación 4.15) y la segunda incluye además la dependencia respecto del espesor de la muestra (ecuación 4.16).

Los resultados obtenidos en el proceso de validación, muestran que los coeficientes de difusión propuestos permiten una mejor estimación de la desorción de humedad de los aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite, que si se emplea el coeficiente de difusión propuesto por Foss, este último referenciado de manera regular en la literatura técnica.

La dependencia, evidenciada en este estudio, del coeficiente de difusión de humedad de papeles aislantes de transformador respecto del espesor del aislamiento,

no ha sido reportada hasta el momento en la literatura técnica. Sin embargo, como se ha mencionado, sí se han encontrado comportamientos similares en estudios experimentales de otros materiales higroscópicos. El origen de esta dependencia aún no ha sido explicado.

Los resultados de la validación permiten concluir, que al incluir la dependencia del coeficiente de difusión de humedad respecto del espesor se puede estimar de manera más precisa la desorción de humedad del papel sometido a secado, incluyendo además una mejor respuesta a las variaciones de temperatura.

La metodología para la determinación del coeficiente de difusión de humedad, presentada en este capítulo puede emplearse en la determinación del coeficiente de difusión de otro tipo de materiales aislantes celulósicos empleados en transformadores de potencia como son los cartones prensados y los papeles térmicamente mejorados.

Capítulo 5

Determinación del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados

El coeficiente de difusión de humedad para papeles propuesto en el capítulo 4 permite, a través de un modelo matemático de difusión, estimar la dinámica de humedad en aislamientos celulósicos de papel no impregnados de aceite. El coeficiente propuesto resulta útil para analizar los procesos de adsorción y secado de transformadores durante su proceso de construcción. Sin embargo el coeficiente de difusión de humedad obtenido no puede ser empleado para el análisis de la dinámica de humedad de transformadores en servicio, ya que en este caso los aislamientos celulósicos están impregnados de aceite.

La presencia del aceite provoca una reducción de la movilidad del agua en el interior de los aislamientos haciendo que el valor del coeficiente de difusión sea menor. Autores como Foss [33], reportan una disminución en el valor del coeficiente de difusión de humedad de dos órdenes de magnitud a causa de la impregnación de aceite en el papel.

El coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos impregnados de aceite puede ser empleado para analizar los procesos de migración de humedad en transformadores en servicio. Según muestran estudios recientes [62, 95], el nivel de degradación de los aislamientos celulósicos afecta a su capacidad de adsorción de agua y ello hace pensar que también puede tener efecto en la movilidad de la humedad en su interior. Esto se justifica por el hecho de que la rotura de las cadenas de la celulosa produce una disminución del número de sitios activos en los que se adhieren las moléculas de agua, a la vez que aumentan los espacios vacíos en el interior del papel, lo que supone un posible aumento en la movilidad del agua.

En el presente capítulo se describe el proceso de obtención del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados de aceite mineral. El coeficiente de

difusión de humedad ha sido determinado tanto sobre papeles nuevos como sobre papeles envejecidos.

En el capítulo 4 del presente trabajo, se ha mostrado el método empleado para obtener el coeficiente de difusión de humedad en papeles no impregnados de aceite. En aquel caso, el coeficiente se determinó a partir de curvas de secado obtenidas mediante un analizador TGA. En el caso de papeles impregnados no es factible emplear esta misma metodología experimental, ya que si se usara un experimento de tipo gravimétrico sería difícil discriminar qué parte de la variación de la masa de la muestra de aislamiento de papel registrada durante el secado se debe a la desorción de la humedad en el aislamiento y qué parte a la evaporación del aceite con que está impregnado el aislamiento.

En el caso de papeles impregnados se decidió emplear un método experimental basado en la obtención de curvas de secado. Para el secado del aislamiento se aplicó el método de circulación de aceite caliente, que es uno de los métodos de secado más empleados en transformadores en servicio. La circulación de aceite alrededor de los aislamientos celulósicos es la condición de operación habitual del transformador, con lo cual la dinámica de este proceso de secado es del mismo tipo que se tiene en el sistema papel-aceite del transformador.

Para la determinación del contenido de humedad de las muestras de aislamiento extraídas durante el proceso de secado, se empleó el análisis químico según el método Karl Fischer [115].

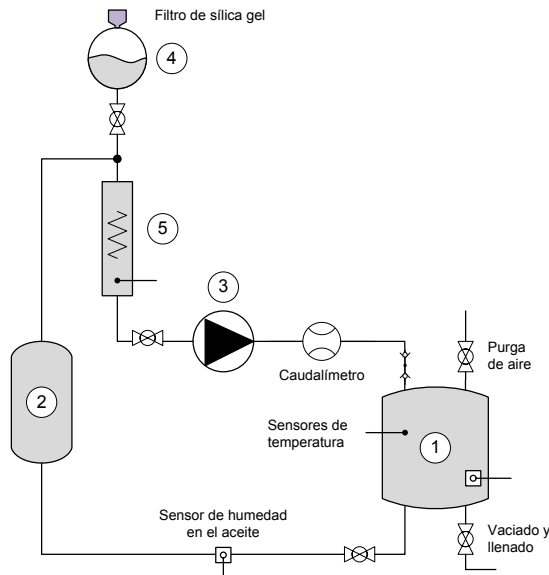
5.1 Planta de secado empleada en el estudio experimental

Para recrear el secado por circulación de aceite se construyó una planta de secado a escala, con la que se puede forzar la desorción de humedad en los especímenes de aislamiento bajo ensayo, haciendo fluir sobre éstos aceite caliente y con un bajo contenido de humedad.

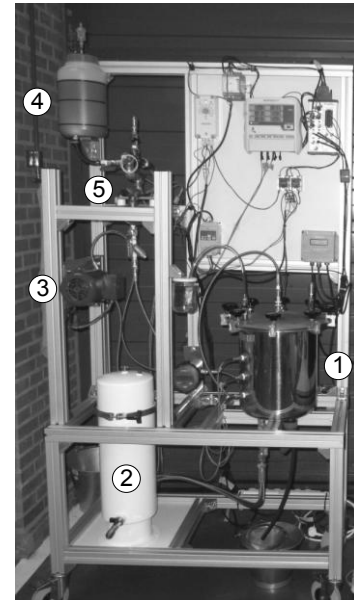
En la Figura 5.1 se presentan el esquema general y una fotografía de la planta de secado por circulación de aceite.

La planta consta de un depósito en el que se introducen los especímenes de aislamiento a analizar, un filtro para extraer la humedad del aceite, un calefactor para modificar la temperatura del mismo, un vaso de expansión para compensar los cambios de volumen del aceite por las variaciones de temperatura y una bomba para

la recirculación del aceite en el circuito de la planta. La planta también dispone de dos resistencias que, adosadas a los especímenes de prueba, permiten emular el calor generado desde los conductores del transformador durante su operación normal o bien durante un secado con calentamiento mediante LFH.



(a)



(b)

Figura 5.1 Planta de secado por circulación de aceite. (a) esquema general, (b) fotografía.
1-depósito de muestras, 2-filtro de aceite, 3-bomba de recirculación,
4-vaso de expansión, 5-calefactor.

En la planta se instalaron cinco sensores de temperatura. Dos de ellos (del tipo Pt100) se ubicaron en el calefactor, los tres restantes son de fibra óptica y se ubicaron en el depósito de muestras. Uno de los sensores de temperatura del depósito de muestras registra la temperatura del aceite y los dos restantes registran la temperatura de los especímenes bajo prueba. En la planta también se dispone de un caudalímetro y de un sensor de humedad en el aceite, ubicado a la salida del depósito de muestras.

Las distintas señales de los sensores son captadas a través de una tarjeta de adquisición de datos y enviadas a un ordenador.

El sistema de control toma las señales de temperatura del aceite, provenientes del calefactor y del depósito de muestras, para controlar el encendido y apagado del calefactor, de modo que la temperatura del aceite en el depósito se mantenga próxima al valor de consigna. Asimismo la señal del caudalímetro es utilizada para

actuar sobre la velocidad de la bomba y de este modo controlar el caudal de recirculación del aceite en la planta. Además el sistema de control usa las señales de temperatura provenientes de los especímenes de prueba para controlar el encendido y apagado de las resistencias que simulan el calor aportado al aislamiento desde los arrollamientos del transformador.

En la Tabla 5.1 se presentan las principales especificaciones de la planta de secado por circulación de aceite. En la Figura 5.2 se muestra la interfaz del sistema de control de la planta de secado.

Tabla 5.1 Especificaciones de la planta de secado por circulación de aceite.

Especificación	Valor
Volumen depósito de muestras	20 L
Temperatura aceite depósito de muestras	Ambiente – 100 °C
Temperatura calentamiento interno	Temperatura aceite – 120 °C
Caudal de circulación de aceite	0 – 60 L/h
Filtro de aceite	Velcon Systems, Superdri® SD-718
Humedad del aceite	< 10 ppm



Figura 5.2 Interfaz del sistema de control de la planta de secado.

En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de las variables registradas en la planta de secado. El caso particular mostrado en la figura corresponde a un secado por circulación de aceite a 85 °C, en el que no se ha simulado la aportación de calor desde los arrollamientos. Los picos que se observan en la gráfica corresponden con los instantes en que se detiene la circulación de aceite de la planta para la extracción de las muestra del aislamiento, para la posterior determinación del contenido de humedad.

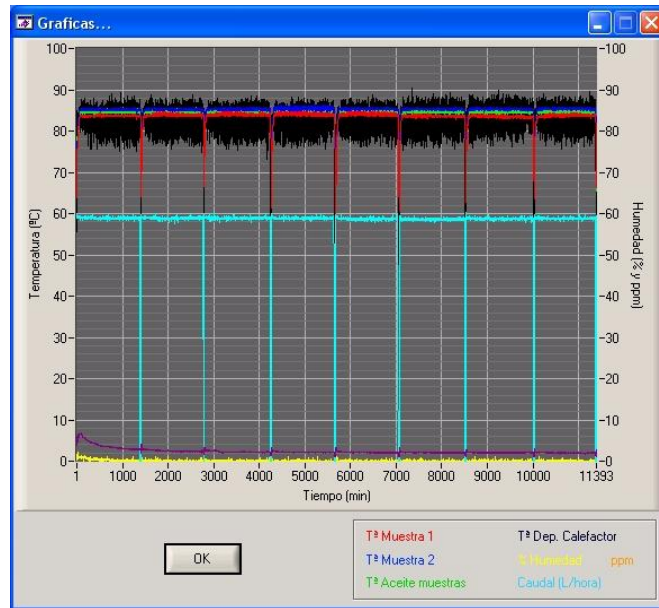


Figura 5.3 Registro de señales en la planta de secado.

5.2 Preparación de los especímenes de prueba para los experimentos de secado

Antes de comenzar con los experimentos de secado, fue necesario establecer un protocolo de preparación de los especímenes de aislamiento de papel, empleados en el estudio experimental.

Los especímenes de prueba debían tener un contenido de humedad inicial suficientemente alto y homogéneo y estar impregnados con aceite. Además en el caso de aislamiento de papel envejecido, se sometió a los especímenes de prueba a un proceso de envejecimiento acelerado previo a la etapa de humectación e impregnación con aceite.

Los experimentos para la obtención del coeficiente de difusión se realizaron sobre especímenes de aislamiento de 1 mm, 3 mm y 5 mm de espesor. Estos espesores se consiguieron arrollando capas de papel Kraft, de 0,1 mm de espesor, sobre un núcleo de aluminio (Figura 5.4). Para lograr los espesores de 1 mm, 3 mm y 5 mm se emplearon respectivamente 16, 40 y 68 capas de papel Kraft.

El núcleo de aluminio empleado tiene una sección de forma octagonal para facilitar la extracción de las muestras de papel durante el secado, y cuenta además en su parte superior e inferior, con unos topes que limitan la desorción de humedad en el sentido longitudinal del aislamiento. Con esto se puede garantizar que la desorción

de humedad se produce de forma unidireccional, tal y como ocurre en el aislamiento de un transformador de potencia.

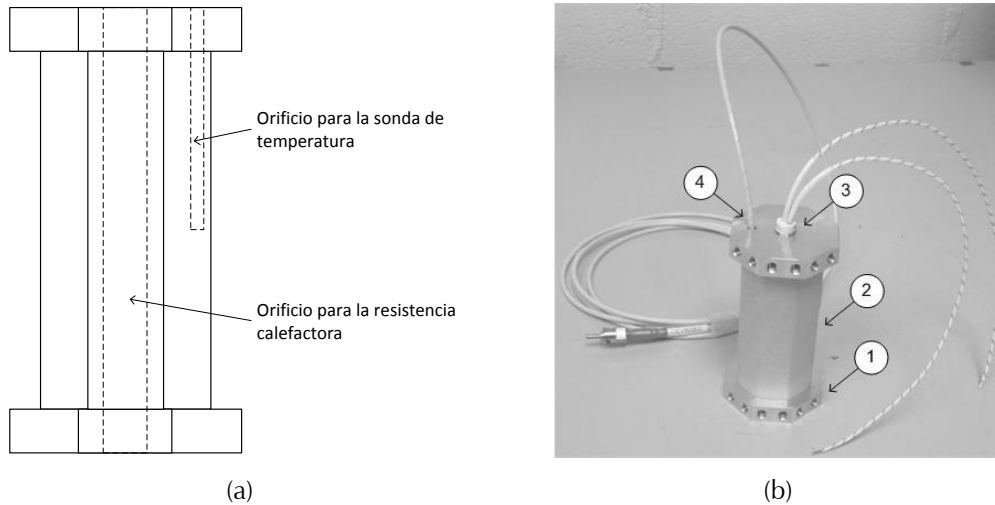


Figura 5.4 (a) Dibujo del núcleo de aluminio, (b) Espécimen de aislamiento de 1 mm de espesor. 1-núcleo de aluminio, 2- aislamiento de papel, 3- resistencia para emular el calentamiento desde los conductores, 4- sonda de temperatura para medir la temperatura interna del aislamiento.

El núcleo de aluminio cuenta con un orificio central en el cual se puede alojar la resistencia que emula el calentamiento del aislamiento aportado desde los arrollamientos del transformador, así como con un orificio, cercano a la superficie donde se arrolla el papel, en el cual se aloja la sonda de temperatura que mide la temperatura interna del aislamiento.

5.2.1 Envejecimiento de los especímenes de aislamiento

Como se ha comentado, uno de los objetivos del estudio experimental fue determinar la influencia de la degradación del papel en el valor del coeficiente de difusión de humedad. Para ello se realizaron pruebas sobre especímenes de aislamiento de papel nuevo y sobre especímenes de aislamiento de papel envejecido con una pérdida de vida cercana a 2/3 partes de su vida útil total.

Para lograr el envejecimiento requerido se emplearon los conceptos de vida útil y pérdida de vida del aislamiento celulósico, recogidos en la Guía IEEE sobre cargabilidad de transformadores inmersos en aceite [52]. En dicha Guía se presentan distintos criterios para definir la vida útil del aislamiento celulósico de un transformador inmerso en aceite. Uno de ellos, el que se decidió usar en este trabajo de tesis, consiste en considerar que la vida útil del aislamiento (1 pu de vida)

corresponde a un aislamiento funcionando de manera continuada por un periodo de 150 000 horas (17,12 años) a una temperatura de 110 °C. Se considera que una vez transcurrido este periodo, las condiciones mecánicas del aislamiento celulósico, definida por la resistencia a la tracción, la cual se relaciona con el grado de polimerización de la celulosa (DP), no permite una operación segura del transformador. De acuerdo al criterio antes mencionado, al final de la vida útil del aislamiento celulósico, el grado de polimerización tiene un valor de 200, que coincide con lo indicado en otras referencias [16, 74].

La ecuación 5.1, relaciona la vida útil del aislamiento celulósico con la temperatura de operación del aislamiento. Esta función se ha representado gráficamente en la Figura 5.5.

$$\text{Vida útil (pu)} = 9,8 \times 10^{-18} \cdot e^{\left[\frac{1500}{T+273} \right]} \quad 5.1$$

donde T es la temperatura del aislamiento (°C).

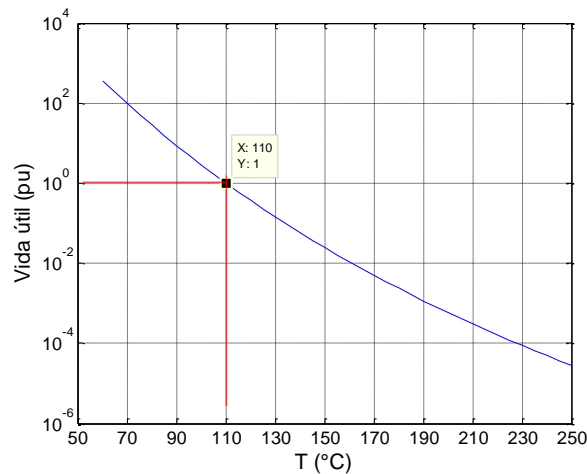


Figura 5.5 Vida útil del aislamiento celulósico, en función de la temperatura.

Como se observa en la Figura 5.5, la vida útil del aislamiento se reduce de forma exponencial con el aumento de temperatura. Tomando como referencia la temperatura de 110 °C, correspondiente con 1 pu de vida del aislamiento, es posible plantear un factor de aceleración de envejecimiento del aislamiento celulósico (F_{AA}).

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{1500}{383} - \frac{1500}{T+273} \right]} \quad 5.2$$

Si la temperatura a la que se expone el aislamiento permanece constante, el F_{AA} también es constante y por tanto, mediante la relación dada en la ecuación 5.3, es

posible determinar el tiempo de exposición requerido para que, a la temperatura T , se produzca una determinada pérdida de vida en el aislamiento.

$$t_{\text{exp}} = \frac{\text{vida perdida (h)}}{F_{AA}} \quad 5.3$$

donde t_{exp} es el tiempo de exposición (h).

Para acelerar el envejecimiento de las muestras se decidió emplear una temperatura de 160 °C ($F_{AA} = 92,06$) y un tiempo de exposición de 1 200 h (50 días). En estas condiciones la pérdida de vida esperada es de 110 472 h (0,736 pu), lo que supone un valor cercano al inicialmente planteado⁵.

Para envejecer los papeles aislantes, en primer lugar, se eliminó su humedad. Esto se hizo para evitar una degradación excesiva de la celulosa por efecto de la hidrólisis y la oxidación. Para ello se mantuvieron los especímenes de prueba en una estufa durante una semana a una temperatura de 100 °C y a presión atmosférica. Posteriormente se aplicó vacío en la estufa de secado y se elevó la temperatura a 160 °C manteniendo estas condiciones durante 50 días. La aplicación de vacío a estos niveles de temperatura es importante para evitar oxidación del papel durante el proceso de envejecimiento de los especímenes de prueba [16, 18, 74].

Para evaluar el grado de envejecimiento obtenido en las muestras, se determinó experimentalmente su grado de polimerización, siguiendo los procedimientos recogidos en las normas UNE-EN 60450 [112], y ASTM D4243 [7].

El grado de polimerización medio (\overline{DP}_v), medido en los especímenes de prueba de aislamiento nuevo fue de 1 104, y en los especímenes de aislamiento envejecido fue de 487.

Tabla 5.2 Condición del aislamiento de acuerdo al grado de polimerización medio. Tomado de [112].

Condición de la muestra	\overline{DP}_v
nuevo	1000 a 2000
bueno	650 a 1000
mediano	350 a 650
envejecido	<350

⁵ El valor de pérdida de vida del papel inicialmente planteado era de 2/3 o 0,667 pu.

De acuerdo a lo indicado en la Tabla 5.2, el valor de \overline{DP}_v obtenido después del proceso de envejecimiento acelerado permite clasificar el estado del aislamiento como “mediano”. Este estado puede corresponderse con el que típicamente aparece en los aislamientos de los transformadores que se someten a procesos de secado en campo, lo cual es adecuado ya que uno de los objetivos de este trabajo de tesis es disponer del valor del coeficiente de difusión con el cual poder analizar la dinámica de la humedad en los aislamientos de transformadores que ya han estado en servicio.

5.2.2 Humectación e impregnación de los especímenes de aislamiento

Antes de ser impregnados con aceite, los especímenes de prueba, tanto de papel nuevo como envejecido, se sometieron a un proceso de humectación. Para ello se mantuvieron por un tiempo de al menos dos semanas en una cámara climática bajo condiciones controladas de temperatura (35 °C) y humedad relativa (70%). Las condiciones aplicadas durante este periodo se establecieron teniendo en cuenta las curvas de Jeffries [55], esperando obtener una concentración de equilibrio próxima al 8% (Figura 5.6).

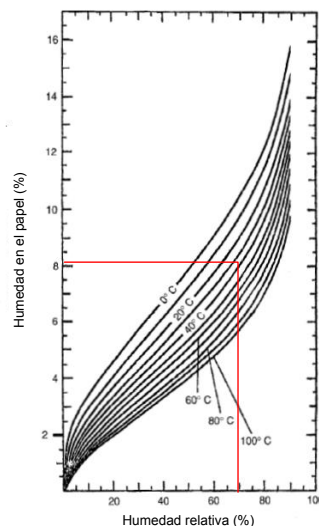


Figura 5.6 Curvas de Jeffries, condiciones de humectación escogidas.

Este primer periodo de humectación se realizó con las muestras aún sin impregnar para facilitar que la humedad penetrara más fácilmente en la totalidad del aislamiento y obtener así una humedad más homogénea en toda la muestra.

Posteriormente los especímenes de prueba se impregnaron de aceite. Para ello se sumergieron en aceite a temperatura ambiente y presión atmosférica por un periodo no inferior a una semana.

Finalmente, los especímenes de prueba ya impregnados de aceite se introdujeron de nuevo en la cámara climática, para realizar una re-humectación del aislamiento. Los especímenes de prueba se mantuvieron en esta etapa de re-humectación hasta el momento del secado.

Durante la etapa de re-humectación, los primeros especímenes de prueba sometidos a secado en la planta de circulación de aceite se mantuvieron en la cámara climática durante dos semanas. Al medir la concentración de humedad antes de los secados, se encontraron valores de humedad inferiores a los esperados (entre un 5,39% y un 6,84%). Los valores de concentración de humedad más bajos se encontraron en las muestras de mayor espesor de aislamiento.

Esto indica que durante la etapa de impregnación de aceite, el contenido de humedad y la distribución de la misma en el interior del aislamiento se modifica y que al estar impregnado de aceite, la movilidad del agua en el aislamiento se ve reducida, por lo cual, si se desea un valor de humedad en torno al 8% y que la distribución de humedad en el espesor del aislamiento sea homogénea, el tiempo de permanencia de las muestras en la cámara climática durante la etapa de re-humectación debe ser mayor.

A la vista de estos primeros resultados, se decidió que el tiempo de permanencia de los especímenes de aislamiento impregnados, en la cámara climática, durante la etapa de re-humectación, no fuese inferior a un mes. De este modo, las humedades alcanzadas en los especímenes de papeles envejecidos al inicio del proceso de secado estuvieron por encima del 7,3% y en especímenes de papel nuevo en torno al 8%.

5.3 Experimentos de secado

Como ya se ha mencionado, los experimentos de secado consistieron en someter a los especímenes de prueba, previamente humedecidos e impregnados de aceite, a un flujo constante de aceite caliente y con un bajo contenido de humedad. Antes de empezar cada ensayo de secado, se extrajeron muestras de papel de cada espécimen de prueba. Dichas muestras se analizaron en el laboratorio mediante el método Karl

Fischer determinando de este modo la humedad inicial de las muestras. Se debe aclarar que la humedad medida de este modo, es la humedad promedio a lo largo del espesor del papel, que es la variable que se manejará en todo el estudio experimental.

Durante el proceso de secado, y con el fin de obtener la evolución de la humedad en el papel, se tomaron y analizaron muestras periódicamente. Para la extracción de las muestras durante el secado se requiere detener la circulación de aceite, drenar parcialmente el aceite del depósito de muestras para su apertura, y de forma rápida realizar la extracción de las muestras de papel de los especímenes de prueba. Durante este proceso se siguen registrando las variables de la planta de secado. El proceso de extracción de las muestras se debe llevar a cabo de forma extremadamente meticulosa para evitar su contaminación.

Una vez retirado del depósito de muestras, el espécimen de prueba es llevado rápidamente a una zona contigua a la planta de aceite en la que la humedad relativa del ambiente es controlada con valores por debajo de 40%. La extracción de las muestras de papel se realiza mediante una herramienta perforadora especialmente construida para tal fin. Las muestras de papel extraídas se confinan en recipientes con aceite que se ubican dentro de un desecador mientras esperan a ser analizadas. La Figura 5.7 ilustra la extracción de las muestras de papel y en la Figura 5.8 se presenta la curva de secado de un espécimen de prueba de papel envejecido de 5 mm de espesor, secado con aceite circulando a 60 °C y con una emulación de calor desde el interior de 100 °C.



Figura 5.7 Extracción de muestras de aislamiento, para la determinación del contenido de humedad durante el secado.

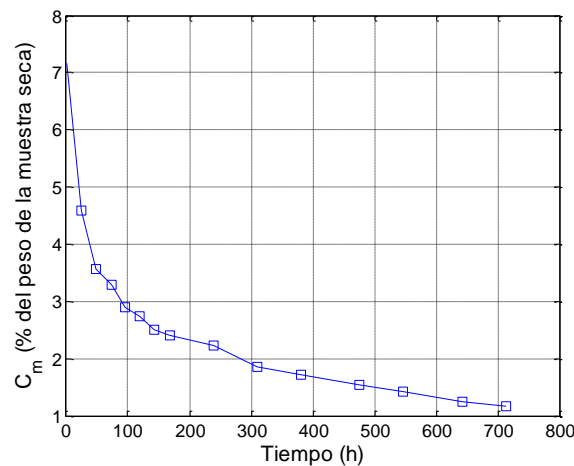


Figura 5.8 Curva de secado obtenida de para uno de los especímenes de prueba.

5.3.2 Descripción de los experimentos de secado realizados

En una primera etapa se realizaron experimentos encaminados a depurar los distintos procedimientos experimentales. Esta primera etapa experimental se realizó sobre papeles nuevos.

Una vez depurados los procedimientos de ensayo, se pasó a una segunda etapa en la cual se probaron especímenes de prueba que incluyeron también aislamientos con papel envejecido. Las curvas de secado obtenidas en los distintos especímenes de prueba se emplearon en la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad de papeles impregnados de aceite.

Experimentos de secado preliminares

Durante esta etapa se evaluó el procedimiento para la de extracción de las muestras de papel encontrándose que, a pesar de que las muestras de papel extraídas se encontraban impregnadas de aceite y de que el proceso de extracción tenía una duración inferior a cinco minutos por cada espécimen, aparecía una influencia de la humedad ambiente del laboratorio que afectaba a las mediciones. Dicha influencia de la humedad ambiente normal del laboratorio se observó tanto en el proceso de extracción de muestras como en la determinación de su contenido de humedad mediante el equipo de valoración Karl Fischer.

A la vista de estos resultados se decidió adecuar una zona de baja humedad en el laboratorio (Figura 5.9), en la cual la humedad relativa del aire es mantenida en valores en torno al 40% como se muestra en el registro de la Figura 5.10.



Figura 5.9 Zona de baja humedad para la extracción de las muestras de aislamiento.
(a) vista exterior, (b) vista interior.

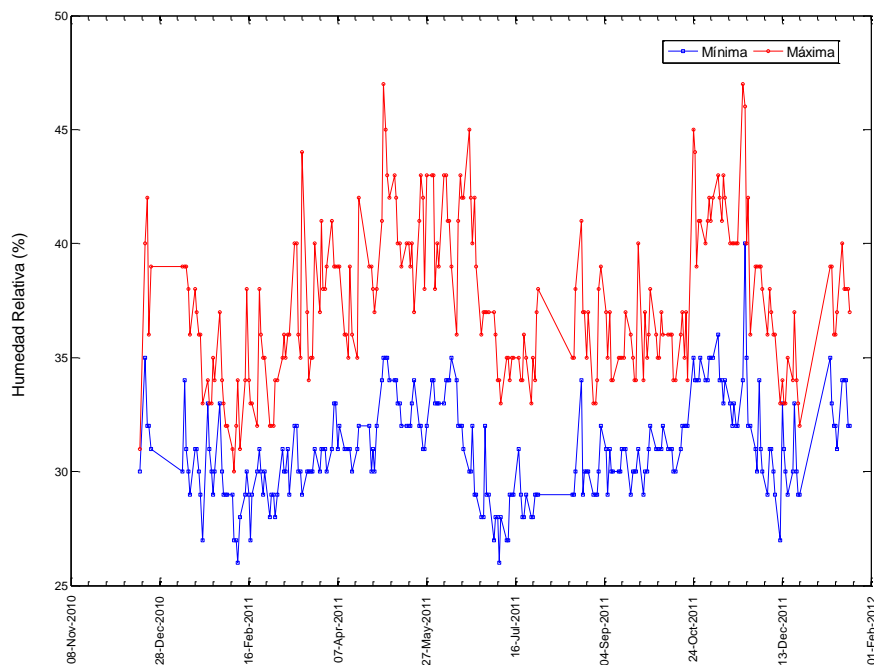


Figura 5.10 Registro de humedad relativa de la zona para extracción de muestras.

En esta primera etapa también se analizó la influencia del caudal de circulación de aceite en el secado de los especímenes de prueba. Para ello se probaron caudales de 20 L/h y 60 L/h. A la vista de los resultados obtenidos, se decidió emplear en los secados el máximo caudal de circulación de aceite (60 L/h) con lo cual el aceite del depósito se renueva aproximadamente tres veces cada hora. La continua renovación del aceite del depósito facilita el mantener una temperatura homogénea en el aceite del depósito de muestras, así como un bajo contenido de humedad.

Otro de los aspectos analizados en esta primera etapa fue la influencia en el secado, de la posición de los especímenes de prueba dentro del depósito de muestras. Esto se realizó posicionando un espécimen de prueba de 3 mm de espesor, en una orilla del depósito de muestras y manteniéndolo en la misma posición durante un secado con aceite a 80 °C y sin emulación de calor desde el interior. El contenido de humedad del aislamiento se determinó para cuatro caras diferentes del espécimen de prueba. Como se observa en la Figura 5.11, la concentración de humedad en las distintas caras del aislamiento del espécimen de prueba, presenta pequeñas diferencias atribuibles a la incertidumbre propia asociada con su medición. Por tanto se concluyó que para el caudal seleccionado, la posición del espécimen de prueba dentro del depósito de muestras no tiene influencia sobre el secado del aislamiento. Por lo cual se decidió posicionar los especímenes de prueba cerca de la orilla del depósito como se muestra en la Figura 5.12, donde se observan seis especímenes de prueba durante uno de los secados realizados.

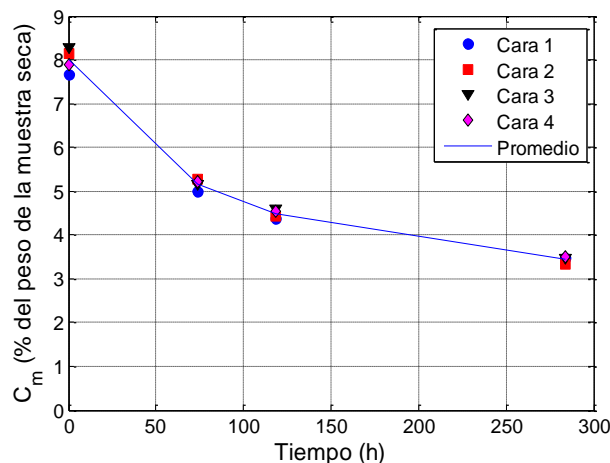


Figura 5.11 Curva de secado de diferentes caras de un espécimen de prueba de 3 mm.

Durante esta primera etapa se encontró también que los tiempos de secado experimentales eran considerablemente mayores que los estimados al emplear el coeficiente de difusión de humedad de Foss [25, 33], que tal como se comentó es el coeficiente de difusión más ampliamente referenciado en la literatura. Los resultados de esta etapa experimental preliminar, permitieron determinar los tiempos típicos de secado de los especímenes de prueba, obligando a replantear los experimentos de secado, que inicialmente estaba previsto que durara cada uno un tiempo aproximado de 120 h (5 días), pasando a durar alrededor de 700 h (30 días). Adicionalmente, los

resultados permitieron establecer los intervalos para la toma de muestras durante los secados.

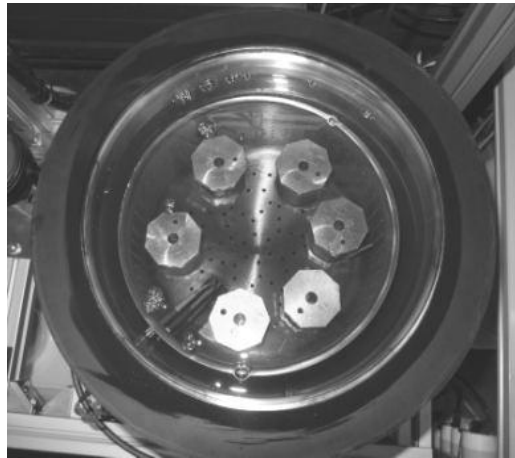


Figura 5.12 Especímenes de aislamiento en el depósito de muestras.

En la Figura 5.13 se muestran los resultados obtenidos al analizar las muestras extraídas sobre un aislamiento de 5 mm de espesor secado durante 163 horas con aceite circulando a 80 °C, y con un contenido de humedad inferior a 10 ppm. En la figura se muestra también la curva de secado simulada usando el coeficiente de difusión para papel Kraft impregnado propuesto por Foss. Tal y como se puede observar, la evolución de la humedad estimada utilizando el coeficiente de difusión de Foss es enormemente optimista, siendo la humedad medida al final del proceso del 3,46%, mientras que la humedad estimada al emplear el coeficiente de difusión propuesto por Foss es 1,65%.

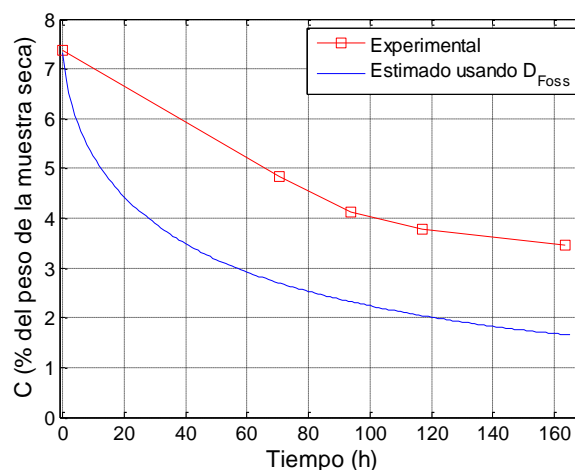


Figura 5.13 Curva de secado experimental y estimada usando el coeficiente de difusión propuesto por Foss, para un aislamiento de 5 mm de espesor y temperatura de secado de 80 °C.

Experimentos de secado

Para la determinación del coeficiente de difusión de papeles impregnados en aceite se realizaron ensayos de secado sobre especímenes de tres espesores distintos (1 mm, 3 mm y 5 mm) secados con aceite circulando a tres temperaturas diferentes (60 °C, 70 °C y 80 °C). En algunos de los especímenes de prueba se emuló el calor aportado al aislamiento desde el interior (según la metodología explicada en la sección 5.1), a causa de las pérdidas en el cobre de los conductores. Las temperaturas de consigna usadas en el control de la resistencia calefactora fueron 70 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C y 100 °C.

Como se comentó anteriormente los ensayos se realizaron para papeles nuevos y para papeles envejecidos, con el fin de analizar la influencia del grado de envejecimiento del papel en los procesos de difusión de humedad.

En el periodo comprendido entre septiembre de 2010 y noviembre de 2011 se realizaron un total de 14 procesos de secado, en los cuales se procesaron 45 especímenes de prueba distintos. En la Tabla D.1 del Apéndice D se detallan los ensayos realizados así como la codificación que se dio a cada secado y espécimen de prueba. En ese mismo apéndice se muestran las distintas curvas experimentales obtenidas.

5.4 Estimación del coeficiente de difusión

Al igual que en el caso de papeles sin impregnar, para la determinación del valor del coeficiente de difusión se empleó un proceso de optimización por algoritmos genéticos. La función objetivo del proceso de optimización es la distancia euclidiana, que cuantifica la cercanía entre los valores de concentración promedio de humedad obtenidos experimentalmente para cada espécimen de prueba, con los valores estimados mediante el modelo matemático de difusión de humedad que, resuelto mediante el método de los elementos finitos, simula el proceso de secado. A continuación se describe el modelo empleado, la aplicación del proceso de optimización y el análisis estadístico realizado para la obtención de los valores del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados.

5.4.1 Modelo de secado por elementos finitos

El modelo de difusión de humedad que representa el secado del aislamiento en la planta de secado por circulación de aceite, ha sido implementado en la herramienta *Comsol Multiphysics* 3.5a. A continuación se describen las principales características del modelo.

Geometría

Debido a que la desorción de humedad del aislamiento durante el secado se produce de forma unidireccional, se ha empleado una geometría unidimensional que representa el espesor del aislamiento simulado.

Entradas del modelo

Como entradas independientes del modelo, se han usado la concentración inicial de humedad y la temperatura del aislamiento. El valor de la concentración inicial de humedad corresponde con la humedad promedio medida sobre muestras extraídas de cada espécimen de prueba al inicio del proceso de secado. De cara al modelo se considera que al comienzo del experimento, la humedad está uniformemente distribuida en todo el espesor del aislamiento.

En cuanto a la temperatura del aislamiento, ésta se debe considerar de manera diferente dependiendo de si durante el secado del espécimen de prueba se emuló ó no el calor aportado al aislamiento desde los conductores del transformador.

Cuando no se emula el calor desde el interior, se supone que el aislamiento tiene una temperatura uniforme e igual a la del aceite que circula por su superficie.

Cuando se aporta calor generado por las corrientes circulando en los conductores del transformador, en el aislamiento se produce una distribución de temperatura no homogénea. Al considerar la conductividad térmica del aislamiento constante, la distribución de temperatura es lineal (Figura 5.14), siendo entonces la temperatura dentro del aislamiento una función de la distancia, del espesor y de las temperaturas de la cara interna y externa del aislamiento. La distribución de temperatura en el interior del aislamiento se puede calcular mediante la ecuación 5.4.

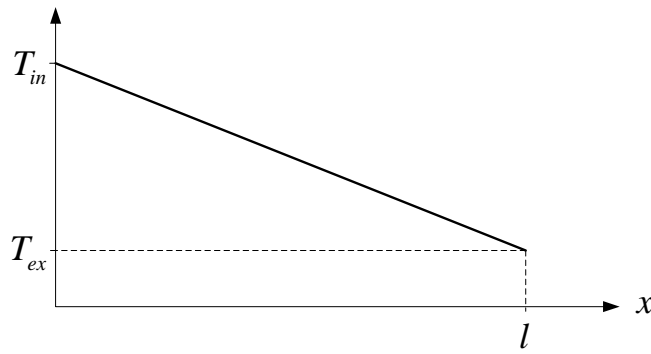


Figura 5.14 Distribución de temperatura en el aislamiento, cuando se emula el calor generado desde los conductores del transformador.

$$T(x) = \left(\frac{T_{ex} - T_{in}}{l} \right) \cdot x + T_{in} \quad 5.4$$

donde:

- $T(x)$: Temperatura en el interior del aislamiento
- T_{in} : Temperatura en la cara interna del aislamiento
- T_{ex} : Temperatura en la cara externa del aislamiento
- l : Espesor del aislamiento
- x : Distancia medida desde la cara interna del aislamiento

Para calcular la distribución de temperatura en el interior del aislamiento, se requiere conocer las temperaturas de las caras interna y externa del aislamiento (la cara que está en contacto directo con el aceite). La temperatura de la cara interna del aislamiento es un dato conocido que corresponde con el valor de consigna que emula el calor transferido desde el conductor del transformador al aislamiento, y fue registrado de manera continua durante los diferentes secados realizados. Los valores de temperatura de la cara externa del aislamiento no se midieron durante los secados, por ello se realiza una estimación de dicha temperatura.

Para la estimación de la temperatura de la cara externa de los aislamientos se realizaron mediciones experimentales sobre especímenes de prueba empleando condiciones similares a las de los secados realizados (espesor del aislamiento, temperatura del aceite y temperatura de la cara interna). La Figura 5.15 ilustra la ubicación de los sensores para la medición de la temperatura en la cara externa del aislamiento en un espécimen de prueba.

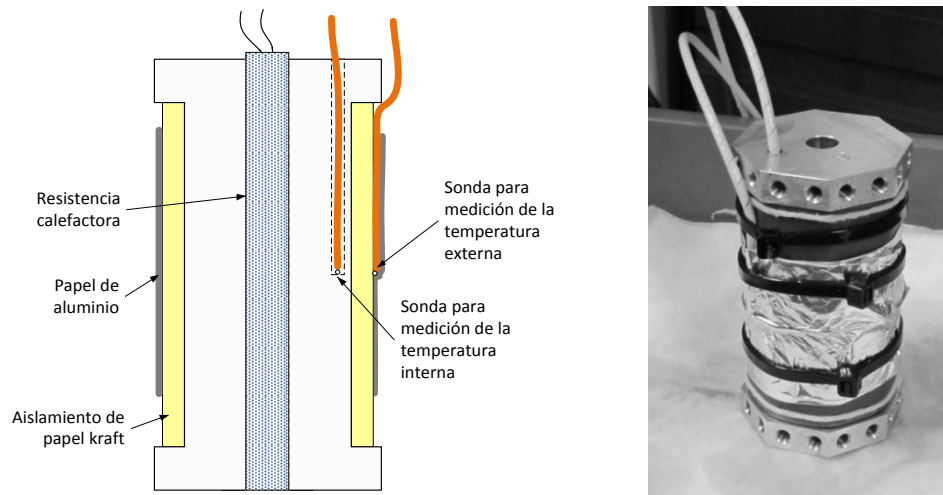


Figura 5.15 Medición de la temperatura de la cara externa del aislamiento.

En la Tabla D.2 del Apéndice D se muestran los resultados de las mediciones de la temperatura de la cara externa de los aislamientos para cada espesor, bajo las distintas condiciones evaluadas durante los secados.

Dado que las resistencias que emulan el calor generado por los conductores tienen un control simple de encendido-apagado, la temperatura interna oscila alrededor del valor de consigna. Por ello la temperatura de la cara externa del aislamiento también oscilará alrededor de los valores mostrados en la Tabla D.2.

Para determinar los valores de temperatura de la cara externa del aislamiento durante el secado, se ha realizado una regresión lineal con los valores de temperatura medidos, estableciendo para cada espesor del aislamiento y temperatura de consigna del aceite, una expresión de la forma $T_{ex} = m \cdot T_{in} + b$, con la cual es posible calcular la temperatura de la cara externa del aislamiento. En la Tabla 5.3 se presentan los valores de los parámetros de la ecuación para el cálculo de la temperatura de la cara externa del aislamiento, obtenidos de la regresión para las diferentes condiciones de secado evaluadas. Las gráficas con los valores experimentales y las curvas de ajuste se muestran en el apartado D.2 del Apéndice D.

Tabla 5.3 Parámetros para el cálculo de la temperatura de la cara externa del aislamiento de acuerdo a la temperatura del aceite.

T_{oil} (°C)	1 mm		3 mm		5 mm	
	m	b	m	b	m	b
60	0,513	28,28	0,360	38,16	0,199	48,93
70	0,562	28,90	0,369	43,99	0,170	59,74
80	0,480	42,80	0,320	54,70	0,220	63,40

Propiedades físicas

La propiedad física con que se describe el aislamiento es el coeficiente de difusión de humedad. Al igual que en el caso de papeles sin impregnar, el coeficiente de difusión de humedad es una función de la concentración local de humedad y de la temperatura, y se ha representado mediante la siguiente ecuación.

$$D = D_0 \cdot e^{k \cdot c(x)} \quad 5.5$$

El factor pre-exponencial D_0 depende de la temperatura y se puede expresar mediante la ecuación 5.6.

$$D_0 = D_1 \cdot e^{\left[\frac{-D_2}{T_k(x)} \right]} \quad 5.6$$

donde:

- D : Coeficiente de difusión de humedad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
- $c(x)$: Concentración local de humedad (%)
- $T_k(x)$: Temperatura en el interior del aislamiento (K)
- k : Parámetro exponencial de D para relacionar la dependencia respecto de la concentración de humedad (adimensional)
- D_1 : Factor pre-exponencial de D_0 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
- D_2 : Factor exponencial de D_0 (K)

Condiciones de frontera

En el modelo de secado es necesario establecer las condiciones de frontera en la cara interna y en la cara externa del aislamiento.

En el caso de los experimentos de secado realizados, la cara interna del aislamiento se encontraba en contacto con el núcleo de aluminio, no existiendo difusión de humedad en ese sentido. Por tanto se consideró la frontera de la cara interna como impermeable.

Por su parte, la cara externa del aislamiento era el punto de contacto entre el aceite y el papel. La condición de frontera incluida en el modelo de secado fue, por tanto, la concentración de humedad de equilibrio del aislamiento con el aceite. Dicha humedad de equilibrio es la concentración que se alcanzaría en la cara externa del aislamiento si la temperatura en dicha interfase y el contenido de humedad del aceite permaneciesen invariables por un periodo de tiempo suficientemente grande.

Para el cálculo de la concentración de equilibrio se ha empleado la expresión propuesta por Fessler [32] que se muestra en la ecuación 5.7.

$$C_e = 2,173 \cdot 10^{-5} \cdot p^{0,6685} \cdot e^{\frac{4725,6}{T_{ex}}} \quad 5.7$$

donde:

C_e : Concentración de humedad de equilibrio en el aislamiento celulósico (% del peso de la muestra seca)

p : Presión parcial de vapor de agua en la interfase papel-aceite (atm)

T_{ex} : Temperatura en la interfase papel-aceite (K)

La presión parcial de vapor de agua y el contenido de humedad del aceite pueden calcularse mediante las ecuaciones 5.8 a 5.11.

$$p = RS \cdot P_{sat} \quad 5.8$$

$$RS = \frac{W_{oil}}{W_{s-oil}} \quad 5.9$$

$$W_{s-oil} = e^{7,42-1670/T_{ex}} \quad 5.10$$

$$P_{sat} = \frac{P_c}{760} \cdot 10^{\left[\left(\frac{T_{ex}-T_c}{T_{ex}} \right) \left(\frac{a+b \cdot (T_c-T_{ex})+c \cdot (T_c-T_{ex})^3}{1+d \cdot (T_c-T_{ex})} \right) \right]} \quad 5.11$$

donde:

RS : Saturación relativa de agua en el aceite

P_{sat} : Presión de saturación de vapor de agua (atm)

W_{oil} : Contenido de humedad del aceite (ppm)

W_{s-oil} : Contenido de humedad de saturación del aceite (ppm)

T_{ex} : Temperatura en la interfase papel-aceite (K)

P_c : Presión crítica del agua, $P_c = 1,65807 \times 10^5$ (mm Hg)

T_c : Temperatura crítica del agua $T_c = 647,26$ (K)

La ecuación 5.11 ha sido tomada de [34]. Los parámetros a, b, c, d de esta ecuación son constantes y tiene los siguientes valores: $a = 3,2437814$, $b = 5,86826 \times 10^{-3}$, $c = 1,1702379 \times 10^{-8}$, $d = 2,1878462 \times 10^{-3}$.

Salida del modelo

Al igual que en el caso de papeles sin impregnar, la resolución del modelo de difusión da como resultado la concentración local de humedad, o perfil de humedad a lo largo del espesor de la muestra, en cada instante de tiempo ($c_{est}(x,t)$). A partir de los perfiles de concentración de humedad se calcula la concentración media de humedad en cada instante mediante la ecuación 5.12. Con los valores de concentración media se construye la curva de secado estimada.

$$C_{m-est}(t) = \frac{1}{l} \cdot \int_{x=0}^{x=l} c_{est}(x,t) dx \quad 5.12$$

5.4.2 Proceso de optimización

El proceso de optimización aplicado en este caso es similar al que se empleó en papeles sin impregnar (ver sección 4.3.3). La diferencia radica en que, debido a la distribución no homogénea de la temperatura en algunos especímenes de prueba, la función objetivo en la cual se incluye el modelo de simulación del secado (Figura 5.16), requiere no dos sino tres parámetros de entrada que son los valores de k , D_1 y D_2 de las ecuaciones 5.5 y 5.6. Estos son precisamente los parámetros que se deben encontrar mediante el proceso de optimización por algoritmos genéticos.

El proceso de algoritmos genéticos (GA), es el encargado de generar los valores de los parámetros k , D_1 y D_2 mediante las operaciones genéticas de cruce y mutación. A continuación se evalúa la función objetivo con estos valores. La función objetivo es la distancia euclidiana (ecuación 5.13), y el resultado de esta función es el que el proceso GA compara con el valor admisible (Fitness Limit) y con el cual determina si el proceso de optimización ha convergido o no.

$$Euclidea = \sqrt{\sum_{i=1}^n [C_{m-est}(t_i) - C_{m-exp}(t_i)]^2} \quad 5.13$$

donde:

- C_{m-est} : Concentración de humedad media, estimada con el modelo de simulación
- C_{m-exp} : Concentración media experimental, medida mediante Karl Fischer
- n : Número de medidas experimentales
- t_i : Instante del secado en que se realizó la medida i

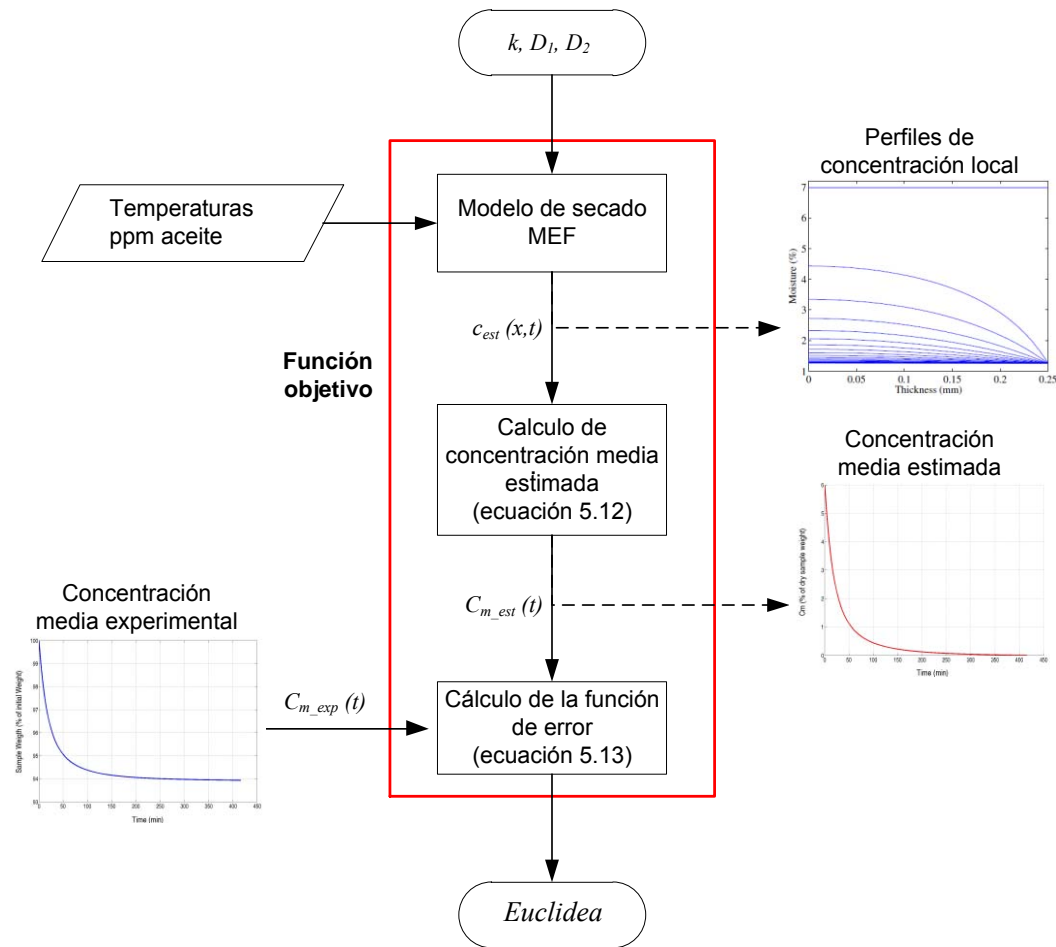


Figura 5.16 Función objetivo empleada en el proceso de optimización.

5.5 Determinación del coeficiente de difusión a partir de las curvas de secado experimentales

Con el fin de obtener una ecuación de aplicación general del coeficiente de difusión, se aplicó el proceso de optimización descrito anteriormente para la estimación de los parámetros k , D_1 y D_2 del coeficiente de difusión de humedad a los 45 especímenes de prueba ensayados en la planta de secado por circulación de aceite.

Como ya se dijo en el caso de la determinación de los parámetros de los papeles sin impregnar, la optimización mediante algoritmos genéticos no es determinista. Por este motivo fue necesario aplicar el proceso varias veces sobre cada espécimen de prueba. El proceso de optimización se realizó 7 031 veces en total, descartando 456 resultados considerados “insatisfactorios”, porque el proceso de optimización no

convergió o porque los resultados obtenidos eran ilógicos. En total se consideraron como válidos 6 575 de los resultados obtenidos.

En la Figura 5.17 se presentan, mediante puntos, la terna de valores (k , D_1 y D_2) de los parámetros obtenidos en las diferentes optimizaciones realizadas. En la figura se han incluido los 6 575 valores válidos obtenidos para los 45 especímenes de prueba, esto es, sin discriminar por espesor del aislamiento, tipo de papel (nuevo o envejecido), temperaturas del aceite y/o temperatura aportada al aislamiento desde los conductores.

Como se puede observar en la Figura 5.17, los valores obtenidos para los tres parámetros que se pretende estimar presentan un grado de dispersión importante, no siendo posible extraer directamente los valores con los que calcular el coeficiente de difusión de humedad del aislamiento de papel impregnado.

A la vista de este resultado, se realizó un análisis estadístico sobre los resultados de las optimizaciones, orientado a determinar si existe dependencia de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad respecto de variables como el tipo de papel (nuevo ó envejecido) o el espesor, como ya se observó en papeles sin impregnar.

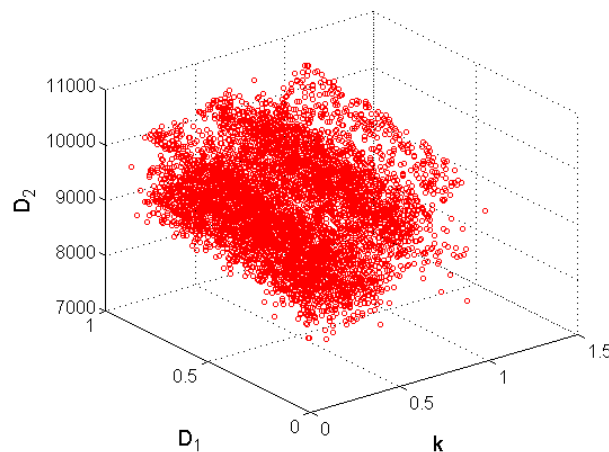


Figura 5.17 Resultados de los procesos de optimización.

Adicionalmente, con el análisis estadístico se buscó encontrar los valores de los parámetros del coeficiente de difusión que fueran representativos de los resultados obtenidos y que permitieran generalizar su uso bajo diferentes condiciones.

5.5.2 Análisis estadístico

Sobre los resultados de las optimizaciones se realizaron dos tipos de análisis de estadística descriptiva: en el primer análisis descriptivo realizado se estudiaron cada uno de los tres parámetros (k , D_1 y D_2) por separado. En el segundo análisis se estudiaron los tres parámetros de manera conjunta, empleando para ello un análisis de media multivariante que se explicará más adelante.

Para la aplicación tanto del análisis descriptivo como del análisis multivariante, se agruparon los resultados de las optimizaciones de dos formas diferentes denominadas “casos individuales” y “casos combinados”.

En cada uno de los 45 casos individuales se agruparon para su análisis los resultados obtenidos de las optimizaciones realizadas a partir de las curvas de secado de cada uno de los diferentes especímenes mostrados en la Tabla 5.4.

Los 33 casos denominados “casos combinados”, agrupan los resultados de especímenes de prueba con características comunes como son el tipo de papel, el espesor del aislamiento y si el secado se realizó o no simulando el calor generado por los conductores del transformador. En la Tabla 5.5 se describen las características consideradas en los 33 casos combinados analizados.

Los 33 casos combinados estudiados consideran todas las posibles combinaciones de características de los especímenes probados; sin embargo, el análisis se ha centrado en ocho de estos casos combinados, que se muestran en la Tabla 5.6. La razón de centrar el análisis estadístico de los casos combinados, en los ocho mostrados en la Tabla 5.6, se debe a que en ellos están reunidas las características que en la hipótesis con la que partió este estudio, se consideraron como las más determinantes en el valor de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados. Estas características son: el espesor del aislamiento y la degradación o no de la celulosa, representada en el tipo de papel (nuevo o envejecido).

Los casos combinados 2 y 3 se han empleado para analizar la influencia del tipo de papel, descartando la influencia del espesor sobre el coeficiente de difusión de humedad, mientras que con los restantes seis casos se ha analizado además la influencia del espesor.

Tabla 5.4 Condiciones de los secados bajo circulación de aceite realizados

Secado No	Código secado	Código Especimen	Tipo Papel	Espesor (mm)	T Aceite (°C)	Calentamiento interno (°C)
1	SA_2010_09_13	10231	Nuevo	3	80	90
		10350	Nuevo	5	80	SC
		10451	Nuevo	5	80	90
2	SA_2010_09_24	10550	Nuevo	5	80	SC
3	SA_2010_10_01	10630	Nuevo	3	80	SC
4	SA_2010_10_13	10730	Nuevo	3	80	SC
5	SA_2010_11_05	10811	Nuevo	1	70	80
		10951	Nuevo	5	70	80
6	SA_2010_12_17	11350	Nuevo	5	60	SC
		11451	Nuevo	5	60	80
		11530	Nuevo	3	60	SC
		11631	Nuevo	3	60	80
7	SA_2011_01_14	11751	Nuevo	5	70	90
		11850	Nuevo	5	70	SC
		11931	Nuevo	3	70	90
		12010	Nuevo	1	70	SC
8	SA_2011_02_09	12111	Nuevo	1	60	90
		12211	Nuevo	1	60	90
9	SA_2011_03_04	12351	Envejecido	5	60	70
		12451	Envejecido	5	60	70
		12550	Envejecido	5	60	SC
		12650	Envejecido	5	60	SC
10	SA_2011_04_25	12751	Envejecido	5	60	85
		12851	Envejecido	5	60	85
		12930	Envejecido	3	60	SC
		13010	Envejecido	1	60	SC
11	SA_2011_06_14	13551	Envejecido	5	60	100
		13651	Envejecido	5	60	100
		13730	Envejecido	3	60	SC
		13810	Envejecido	1	60	SC
12	SA_2011_07_14	13951	Envejecido	5	70	85
		14050	Envejecido	5	70	SC
		14150	Nuevo	5	70	SC
		14231	Envejecido	3	70	85
		14310	Envejecido	1	70	SC
13	SA_2011_08_19	14451	Envejecido	5	70	100
		14551	Nuevo	5	70	100
		14630	Envejecido	3	70	SC
		14730	Nuevo	3	70	SC
		14810	Envejecido	1	70	SC
14	SA_2011_09_19	14951	Envejecido	5	80	100
		15051	Nuevo	5	80	100
		15130	Envejecido	3	80	SC
		15210	Envejecido	1	80	SC
		15310	Nuevo	1	80	SC

SC: No se emuló calentamiento desde el conductor

Tabla 5.5 Descripción de los casos de poblaciones combinadas analizados

Caso No	Espesor (mm)	Tipo de papel		Emulación de calor		No datos
		Nuevo	Envejecido	Sin	Con	
1	1,3,5	x	x	x	x	6575
2	1,3,5	x		x	x	2675
3	1,3,5		x	x	x	3900
4	1,3,5	x	x	x		3617
5	1,3,5	x	x		x	2958
6	1,3,5	x		x		1320
7	1,3,5	x			x	1355
8	1,3,5		x	x		2297
9	1,3,5		x		x	1603
10	1	x	x	x	x	1604
11	1	x		x	x	682
12	1		x	x		922
13	1	x	x	x		1341
14	1	x			x	263
15	1	x		x		419
16	3	x	x	x	x	1686
17	3	x		x	x	729
18	3		x	x	x	957
19	3	x	x	x		1228
20	3	x	x		x	458
21	3	x		x		408
22	3	x			x	321
23	3		x	x		820
24	3		x		x	137
25	5	x	x	x	x	3285
26	5	x		x	x	1264
27	5		x	x	x	2021
28	5	x	x	x		1048
29	5	x	x		x	2237
30	5	x		x		493
31	5	x			x	771
32	5		x	x		555
33	5		x		x	1466

Tabla 5.6 . Descripción de los ocho casos combinados más relevantes

Caso Nº	Descripción
2	Papeles nuevos, se incluyen todos los espesores del aislamiento
3	Papeles envejecidos, se incluyen todos los espesores del aislamiento
11	Papeles nuevos, 1 mm de espesor
12	Papeles envejecidos, 1 mm de espesor
17	Papeles nuevos, 3 mm de espesor
18	Papeles envejecidos, 3 mm de espesor
26	Papeles nuevos, 5 mm de espesor
27	Papeles envejecidos, 5 mm de espesor

Análisis descriptivo

El análisis descriptivo de los parámetros del coeficiente de difusión (k , D_1 y D_2) obtenidos mediante el proceso de optimización, consistió en analizar las variables de forma individual. Para ello se realizó una representación gráfica de las mismas mediante el histograma, incluyendo la gráfica de distribución normal superpuesta y un gráfico de densidad suavizada, como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.18.

La densidad suavizada provee una estimación no paramétrica de la función de densidad de probabilidad de la población de la cual fueron muestreados los datos. Se crea contando el número de observaciones que caen dentro de una ventana de ancho fijo que se mueve a través del rango de los datos.

Adicionalmente, para cada una de estas poblaciones se calcularon las medidas básicas de posición, dispersión y forma, con las cuales se verifica si cada variable analizada puede ser representada mediante un valor de tendencia central como es la media o la mediana.

Las medidas de posición calculadas para el análisis descriptivo son la media aritmética y la mediana. Las medidas de dispersión incluidas son la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación y el rango. Las medidas de forma son el coeficiente de asimetría, la curtosis, la curtosis estandarizada, el sesgo y el sesgo estandarizado.

En el apartado E.2 del Apéndice A, se muestran los resultados del análisis descriptivo de los casos individuales para cada uno de los parámetros y en el apartado E.3, los resultados del análisis descriptivo para los 33 casos combinados.

Como se aprecia en el resultado del análisis descriptivo de los parámetros k , D_1 y D_2 mostrados en el Apéndice A, tanto de los casos individuales como de los casos combinados, existe una alta dispersión en los datos. Sin embargo, se debe resaltar que en los casos combinados el parámetro D_1 presenta una distribución de probabilidad que se asemeja a una distribución rectangular, con valores medios cercanos a 0,5 y que el parámetro D_2 tiende a una distribución de probabilidad que se asemeja a una de tipo normal cuya media y mediana presentan una cierta correlación con el espesor del aislamiento y el tipo de papel.

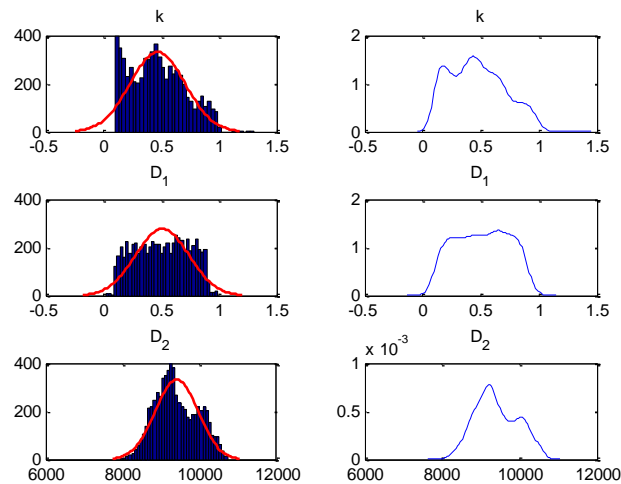


Figura 5.18 Histograma⁶ y gráfico de densidad suavizada de los parámetros k , D_1 y D_2 para el caso combinado No 1.

El parámetro k es el que descriptivamente presenta un comportamiento más impredecible. Esto puede deberse a que es el parámetro que representa la dependencia del coeficiente de difusión de humedad con la concentración local de humedad y los valores de humedad analizados durante el estudio no son altos y además decrecen rápidamente, por lo cual, su efecto solo es significativo al inicio del proceso de secado.

Análisis de media multivariante

El análisis descriptivo realizado a los denominados casos individuales y combinados, permitió tener una apreciación del comportamiento de cada uno de los parámetros k , D_1 y D_2 por separado y a partir de este comportamiento intuir una posible relación o dependencia con las variables de interés como son el tipo de papel o el espesor. Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que durante el proceso de optimización la mínima distancia euclidiana se determinaba para un determinado vector solución formado por una terna de parámetros k , D_1 y D_2 . Es por ello que para encontrar una expresión general del coeficiente de difusión también se debe analizar el comportamiento de estos parámetros de manera conjunta.

El análisis de los parámetros de manera conjunta se ha abordado mediante un análisis multivariante, en el cual se hace uso del concepto de *profundidad estadística*

⁶ Número de veces que se da cada valor de k , D_1 , D_2

[14]. Este concepto hace referencia al grado de centralidad de un punto dado respecto de una nube o una distribución de probabilidad.

En una muestra de datos univariantes, el punto más profundo es alguna medida de tendencia central de la muestra (por ejemplo la media o la mediana). A medida que nos alejamos de ese valor central, la profundidad de los puntos disminuye. Para una nube de puntos multivariante, podemos tomar como punto más profundo una generalización multivariante de la mediana.

Como mediana multivariante se ha usado la mediana espacial que es el punto que coincide con el centro geométrico de la nube de puntos.

Esta mediana multivariante se ha determinado mediante el procedimiento denominado “pelar la cebolla” (onion peeling), el cual se ha implementado en *Matlab*, a través de la función de envolvente convexa (convex hull). Este procedimiento, como se ilustra en el ejemplo de una muestra de dos variables de la Figura 5.19, consiste en quitar sucesivamente las capas externas de la muestra donde están los puntos más externos, hasta llegar al centro de la nube de puntos.

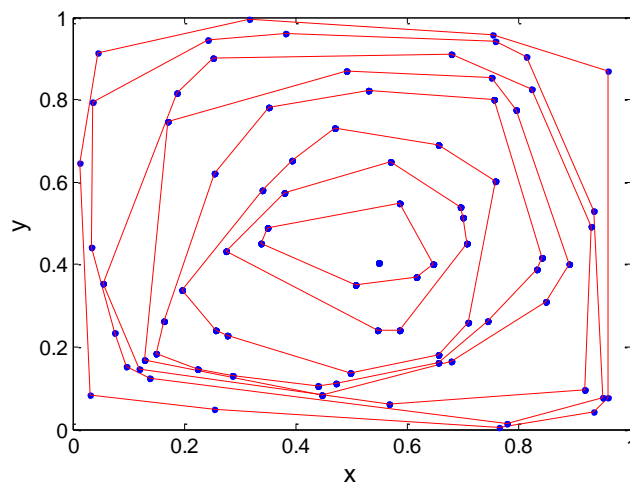


Figura 5.19 Ejemplo del procedimiento “pelar la cebolla”, para determinar la media multivariante de dos variables.

Dado que en nuestro caso el vector solución está compuesto de tres valores (k , D_1 y D_2), la capa externa de la nube de puntos obtenida con las optimizaciones, es la superficie de un volumen. Como se observa en la Figura 5.20, la superficie de dicho volumen puede construirse a través de triángulos, para lo cual antes de aplicar la envolvente convexa se requiere un procedimiento previo denominado triangulación de Delaunay [1]. Con la triangulación se determinan los puntos

contiguos de la nube, que conforman los vértices de cada triángulo. La envolvente convexa se encarga de identificar cuáles son los vértices externos que serán eliminados sucesivamente como parte del procedimiento de “pelar la cebolla”. La mediana multivariante corresponderá a la media de los puntos que conforman la capa más profunda de la nube de puntos.

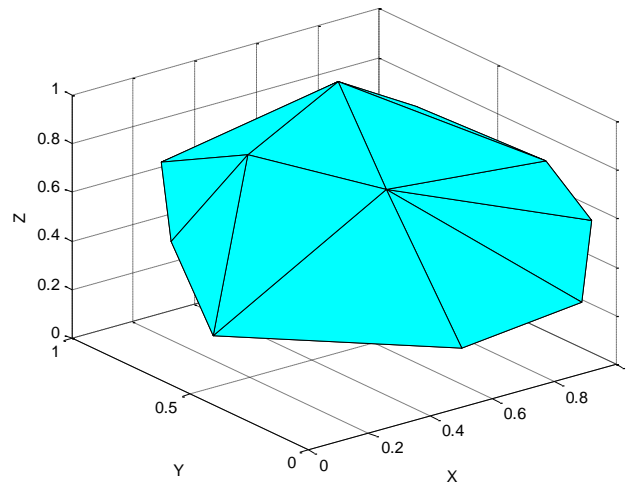


Figura 5.20 Ejemplo de superficie de un volumen construido mediante triángulos.

El procedimiento de mediana multivariante se aplicó a los resultados de las optimizaciones para cada espécimen de prueba (casos individuales) y también a los resultados de los casos combinados. La Figura 5.21 muestra tres volúmenes resultantes al aplicar la triangulación de Delaunay y la envolvente convexa, en diferente número de veces, a las 6 575 ternas de los parámetros k , D_1 y D_2 . Los resultados del análisis multivariante para todos los casos son mostrados en el apartado E.4 del Apéndice A.

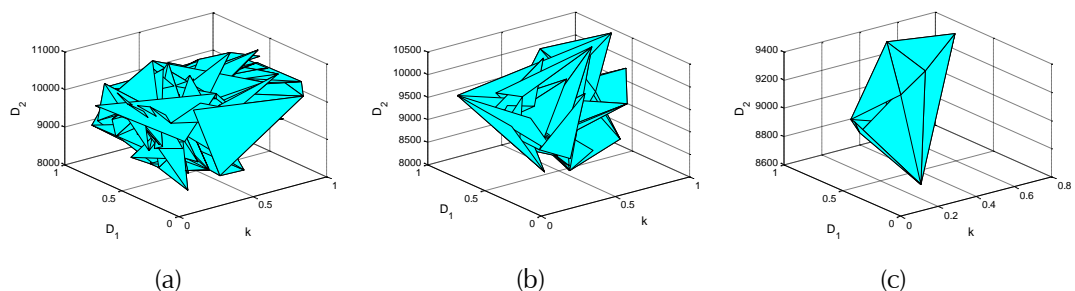


Figura 5.21 Volúmenes resultantes al aplicar la triangulación de Delaunay y envolvente convexa a los datos de la Figura 5.17, (a) 1 vez, (b) 70 veces, (c) 114 veces.

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados de la mediana multivariante de los parámetros k , D_1 y D_2 , correspondiente con cada uno de los casos individuales.

Tabla 5.7 Valores de la mediana multivariante de k , D_1 y D_2 para los casos individuales.

Código	Espesor (mm)	Tipo de papel	No datos	k	D_1	D_2
10231	3	Nuevo	76	0,401	0,664	9684,8
10350	5	Nuevo	82	0,275	0,562	9294,7
10451	5	Nuevo	94	0,595	0,477	9519,8
10550	5	Nuevo	83	0,338	0,584	9066,2
10630	3	Nuevo	85	0,667	0,386	9861,4
10730	3	Nuevo	94	0,706	0,666	10090,5
10811	1	Nuevo	88	0,518	0,400	9866,2
10951	3	Nuevo	85	0,842	0,580	9967,2
11350	5	Nuevo	85	0,157	0,464	8699,8
11451	5	Nuevo	100	0,493	0,702	9122,1
11530	3	Nuevo	56	0,105	0,676	8973,6
11631	3	Nuevo	84	0,422	0,629	9492,8
11751	5	Nuevo	78	0,367	0,611	9346,6
11850	5	Nuevo	82	0,271	0,398	9059,4
11931	3	Nuevo	76	0,448	0,659	9700,2
12010	1	Nuevo	96	0,525	0,489	9886,6
12111	1	Nuevo	93	0,646	0,417	9986,8
12211	1	Nuevo	82	0,664	0,565	10070,4
12351	5	Envejecido	197	0,480	0,583	8761,1
12451	5	Envejecido	199	0,335	0,716	8764,5
12550	5	Envejecido	205	0,409	0,725	8834,2
12650	5	Envejecido	211	0,374	0,695	8740,1
12751	5	Envejecido	20	0,964	0,630	9390,2
12851	5	Envejecido	20	0,985	0,489	9262,2
12930	3	Envejecido	211	0,627	0,655	9405,7
13010	1	Envejecido	198	0,608	0,552	9834,1
13551	5	Envejecido	171	0,857	0,391	9027,3
13651	5	Envejecido	201	0,849	0,455	9118,5
13730	3	Envejecido	86	0,861	0,489	9802,6
13810	1	Envejecido	85	0,646	0,433	9950,8
13951	5	Envejecido	140	0,400	0,629	9130,9
14050	5	Envejecido	139	0,456	0,344	9138,4
14150	5	Nuevo	161	0,326	0,570	9193,2
14231	3	Envejecido	137	0,246	0,343	9082,5
14310	1	Envejecido	137	0,663	0,450	10071,7
14451	5	Envejecido	193	0,413	0,451	9017,7
14551	5	Nuevo	179	0,566	0,552	9288,6
14630	3	Envejecido	196	0,666	0,451	9617,8
14730	3	Nuevo	173	0,714	0,612	10033,9
14810	1	Envejecido	180	0,913	0,567	10471,8
14951	5	Envejecido	325	0,165	0,617	9091,1
15051	5	Nuevo	320	0,355	0,588	9296,0
15130	3	Envejecido	327	0,216	0,544	9504,5
15210	1	Envejecido	322	0,483	0,687	10458,8
15310	1	Nuevo	323	0,141	0,437	10010,8

A partir de estos resultados de media multivariante para los casos individuales se observa que de nuevo k es el parámetro con una variación más impredecible. Los

valores de las medianas de D_1 se mueven en un rango menos amplio que k , comprendido entre 0,343 y 0,725.

Finalmente se observa como D_2 es el parámetro que muestra una cierta tendencia a depender del espesor y el tipo de papel. Sin embargo, debido a que el comportamiento de D_2 respecto de estas variables no es regular en todos los casos individuales, no es posible a partir de estos resultados correlacionar su dependencia respecto del tipo de papel o el espesor.

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados de la mediana multivariante de los parámetros k , D_1 y D_2 , correspondiente con cada uno de los casos combinados.

Tabla 5.8 Valores de la mediana multivariante de k , D_1 y D_2 para los casos combinados.

Caso No	No datos	Medianas		
		k	D_1	D_2
1	6575	0,325	0,631	9162,8
2	2675	0,514	0,580	9283,4
3	3900	0,378	0,493	9052,1
4	3617	0,208	0,319	9285,2
5	2958	0,362	0,527	9034,0
6	1320	0,635	0,649	9940,8
7	1355	0,520	0,548	9261,2
8	2297	0,440	0,439	9581,4
9	1603	0,764	0,459	9072,0
10	1604	0,572	0,514	9981,7
11	682	0,542	0,485	9914,6
12	922	0,566	0,575	9819,3
13	1341	0,561	0,396	9838,6
14	263	0,669	0,566	10086,0
15	419	0,146	0,733	10214,9
16	1686	0,328	0,533	9342,2
17	729	0,651	0,527	9886,8
18	957	0,595	0,613	9373,9
19	1228	0,637	0,503	9758,1
20	458	0,246	0,501	9203,6
21	408	0,712	0,600	10015,2
22	321	0,415	0,633	9489,8
23	820	0,598	0,540	9327,4
24	137	0,246	0,343	9082,5
25	3285	0,372	0,517	9048,3
26	1264	0,516	0,515	9230,1
27	2021	0,440	0,454	8694,8
28	1048	0,347	0,629	8684,2
29	2237	0,390	0,511	9052,7
30	493	0,198	0,608	8910,6
31	771	0,575	0,467	9258,3
32	555	0,421	0,598	8770,4
33	1466	0,406	0,506	8928,5

Al analizar los resultados de las medianas multivariantes de los ocho casos combinados de interés (casos 2, 3, 11, 12, 17, 18, 26 y 27) se aprecia que el parámetro D_2 disminuye su valor al cambiar el tipo de papel de nuevo a envejecido y también cuando el espesor aumenta. Los otros dos parámetros, por su parte, no muestran un comportamiento regular respecto de estas variables.

5.5.3 Coeficiente de difusión de humedad en papel impregnado de aceite

Debido a la dispersión de los datos, los valores de medianas obtenidos tanto del análisis descriptivo individual como del análisis multivariante no permiten obtener de forma clara la terna de parámetros que definen el coeficiente de difusión de humedad, ni relacionarlo de manera coherente con el tipo de papel y/o el espesor del aislamiento.

Sin embargo, como se indicó en un principio, estos análisis estadísticos sí permiten estudiar las posibles correlaciones de los parámetros k , D_1 y D_2 , con las variables de análisis (tipo de papel, espesor, etc.). El parámetro D_2 es el que más se asemeja a una distribución con valor de tendencia central y el que mayor correlación presenta con el espesor del aislamiento y el tipo de papel.

Los dos análisis estadísticos realizados también permitieron ver que en todos los casos analizados existen soluciones del proceso de optimización en las cuales los parámetros k y D_1 del coeficiente de difusión, toman valores de 0,5 y con estos la distancia euclidiana se mantiene en valores aceptables. En el caso del parámetro k el valor de 0,5 coincide con el valor empleado por otros autores como Foss o Guidi. En el caso de D_1 es un valor cercano a las medianas encontradas tanto en el análisis descriptivo como en el análisis multivariante.

Para poder obtener la expresión del coeficiente de difusión de humedad, se decidió entonces realizar una segunda etapa del proceso de optimización, pero esta vez fijando los parámetros k y D_1 en un valor de 0,5 de manera que el único parámetro a encontrar fuese D_2 .

En el apartado E.5 del Apéndice A se muestran los resultados del análisis descriptivo de los valores del parámetro D_2 calculados al fijar el valor de los parámetros k y D_1 en 0,5.

En la Tabla E.12 del Apéndice A se incluyen los valores de la media, la mediana, la desviación típica, la varianza, el coeficiente de variación y el rango obtenidos para cada espécimen de prueba. De los datos mostrados en la tabla se desprende que la dispersión de los datos para cada espécimen es mínima y que los valores de la media y la mediana son similares, por tanto un valor de tendencia central como la mediana podría considerarse representativo de esas poblaciones.

Si se agrupan los valores de D_2 por tipo de papel y espesor, se encuentra que los valores de las medianas de los especímenes 15130, 15210 y 15310 presentan diferencias significativas respecto a los otros especímenes. Por ello, los datos obtenidos sobre estos especímenes no han sido tenidos en cuenta en el cálculo de D_2 para los casos combinados.

En las tablas E.13 y E.14 del Apéndice A y en la Tabla 5.9, se muestran los valores de las medianas del parámetro D_2 para los ocho casos combinados de interés descritos anteriormente en la Tabla 5.6.

Tabla 5.9 Valor de mediana de D_2 casos combinados cuando $k = 0,5$ y $D_1 = 0,5$.

Casos	Espesor (mm)	D_2 (K)	
		Nuevo	Envejecido
2, 3	1, 3, 5	9495,4	9188,5
11, 12	1	9913,7	9906,7
17, 18	3	9675,1	9441,6
26, 27	5	9379,1	8848,0

Dependencia del coeficiente de difusión con el grado de envejecimiento del papel

Cuando se comparan los casos combinados con característica común “tipo de papel” (casos combinados 2 y 3), se observa una reducción en el valor de D_2 cuando el papel es envejecido respecto de cuando éste es nuevo. Esta reducción del valor de D_2 corresponde con un incremento en el valor del coeficiente de difusión de humedad lo cual representa una mayor movilidad del agua en el interior del aislamiento de papel envejecido.

Este resultado es coherente con la hipótesis inicial, ya que al degradarse la celulosa el número de sitios activos se reduce mientras que el entramado de poros y espacios vacíos en el interior del aislamiento aumenta, reduciéndose la tortuosidad

del movimiento del agua durante la difusión de humedad. Resultados similares se aprecian al comparar los resultados de los casos para los distintos espesores.

Dependencia del coeficiente de difusión con el espesor del aislamiento

En la Figura 5.22 se han representado los valores de D_2 en función del espesor y se han dibujado las rectas a las que se podrían ajustar los puntos resultantes. En la Tabla 5.10 se presentan los coeficientes de las rectas de ajuste de D_2 en función del espesor ($D_2 = m \cdot l + b$), así como el coeficiente de regresión del ajuste (R^2).

Tabla 5.10 Coeficientes recta de ajuste de D_2 en función del espesor.

Tipo de papel	m (K mm ⁻¹)	b (K)	R^2
Nuevo	-133,7	10057	0,9962
Envejecido	-264,7	10193	0,9951

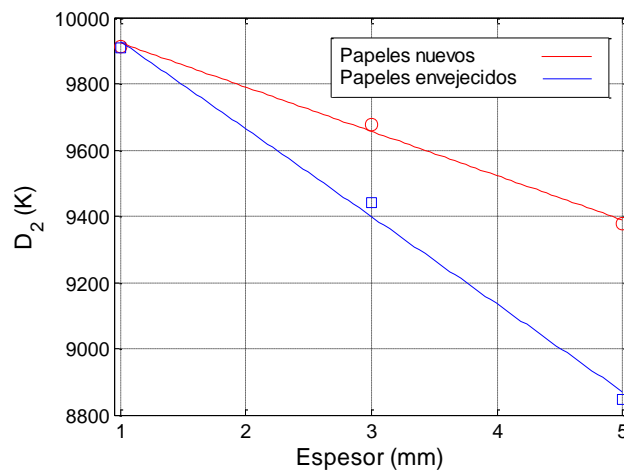


Figura 5.22 Valores de D_2 en función del espesor.

Como se puede observar, existe una relación lineal entre los valores obtenidos para los distintos espesores analizados. Además se puede apreciar cómo al aumentar el espesor del aislamiento se produce una disminución del valor de D_2 y por lo tanto un aumento del valor del coeficiente de difusión. Este comportamiento es similar al encontrado en papeles sin impregnar.

Es de resaltar que la disminución del valor de D_2 con el espesor, es más notoria en papeles envejecidos que en papeles nuevos. Además se debe observar que para el espesor de 1 mm apenas se aprecia diferencia entre el valor de D_2 obtenido en papeles nuevos y en papeles envejecidos.

Ecuaciones propuestas para el coeficiente de difusión

A la vista de las dependencias encontradas, así como de los resultados de los análisis estadísticos anteriores, se pueden establecer las ecuaciones para el cálculo del coeficiente de difusión en papeles nuevos y en papeles envejecidos.

Como se explicó anteriormente, la ecuación del coeficiente de difusión vendrá dada por la expresión

$$D = D_1 \cdot e^{\left[k \cdot c - \frac{D_2}{T_k} \right]} \quad 5.14$$

donde:

- D : Coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
 c : Concentración local de humedad (% del peso de la muestra seca)
 T_k : Temperatura del aislamiento (K)

Al fijar los valores de k y D_1 en 0,5 y remplazar D_2 con los valores de la mediana indicados en la Tabla 5.9 (casos combinados 2 y 3), se pueden plantear las expresiones para el cálculo del coeficiente de difusión en papeles nuevos (ecuación 5.15) y envejecidos (ecuación 5.16). Estas dos ecuaciones no tienen dependencia con el espesor del aislamiento.

$$D(c, T_k) = 0,5 \cdot e^{\left[0,5 \cdot c - \frac{9495,4}{T_k} \right]} \quad 5.15$$

$$D(c, T_k) = 0,5 \cdot e^{\left[0,5 \cdot c - \frac{9188,5}{T_k} \right]} \quad 5.16$$

Al remplazar en la ecuación 5.14, las expresiones para D_2 determinadas con los parámetros de la Tabla 5.10, se está incluyendo la dependencia con el espesor del aislamiento. En dicho caso, las expresiones obtenidas para el cálculo del coeficiente de difusión en papeles nuevos (ecuación 5.17) y en papeles envejecidos (5.18) son:

$$D(c, T_k, l) = 0,5 \cdot e^{\left[0,5 \cdot c - \frac{10057 - 133,7 \cdot l}{T_k} \right]} \quad 5.17$$

$$D(c, T_k, l) = 0,5 \cdot e^{\left[0,5 \cdot c - \frac{10193 - 264,7 \cdot l}{T_k} \right]} \quad 5.18$$

donde D , c y T_k tienen el mismo significado que en las ecuaciones 5.15 y 5.16 y l es el espesor del aislamiento en milímetros.

En la Figura 5.23 se ha dibujado el valor del coeficiente de difusión en función del espesor del aislamiento y de la temperatura para papeles nuevos y para papeles envejecidos de acuerdo a las ecuaciones 5.17 y 5.18. Para elaborar estas gráficas, se ha considerado un valor fijo de la concentración de humedad ($c = 4\%$), se ha variado la temperatura entre $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el espesor se ha evaluado entre 1 mm y 5 mm . Se puede apreciar cómo en ambos casos el coeficiente de difusión de humedad es mayor en papeles envejecidos que en papeles nuevos, y que la diferencia entre ambos coeficientes aumenta con el aumento del espesor y de la temperatura.

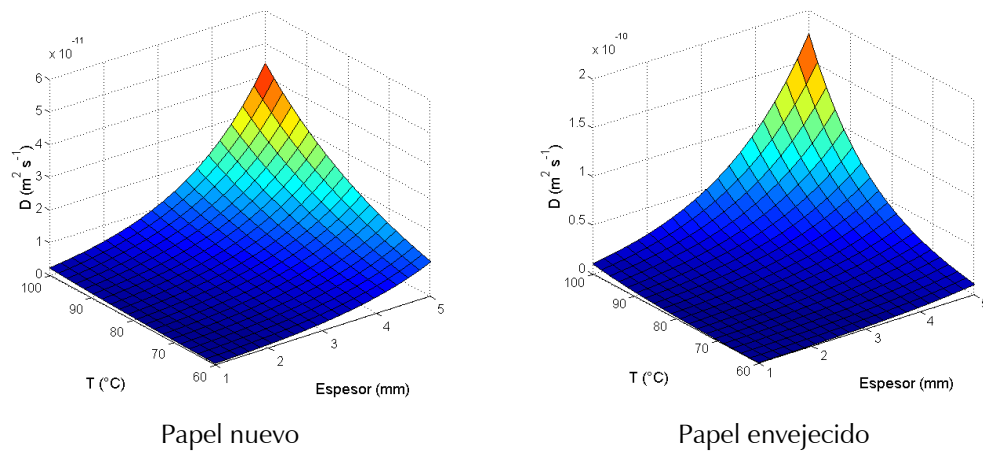


Figura 5.23 Variación del coeficiente de difusión.

En la Figura 5.24 se ha dibujado el coeficiente de difusión de humedad de papeles nuevos y envejecidos en función del espesor (ecuaciones 5.17 y 5.18), manteniendo constantes la concentración local de humedad y la temperatura del aislamiento. Para la gráfica se ha empleado una concentración de humedad de 5% y una temperatura de $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se aprecia de nuevo que el incremento en el valor del coeficiente de difusión con el espesor es mayor en el caso de los papeles envejecidos y a medida que disminuye el espesor del aislamiento la pendiente de las dos curvas tiende a cero. Adicionalmente el valor del coeficiente de difusión de humedad es prácticamente igual en papeles nuevos y envejecidos para el espesor de 1 mm . Por tanto, para aislamientos de espesor inferior a 1 mm , las ecuaciones 5.17 y 5.18 deberían emplearse con un valor de espesor de 1 mm ($l=1$).

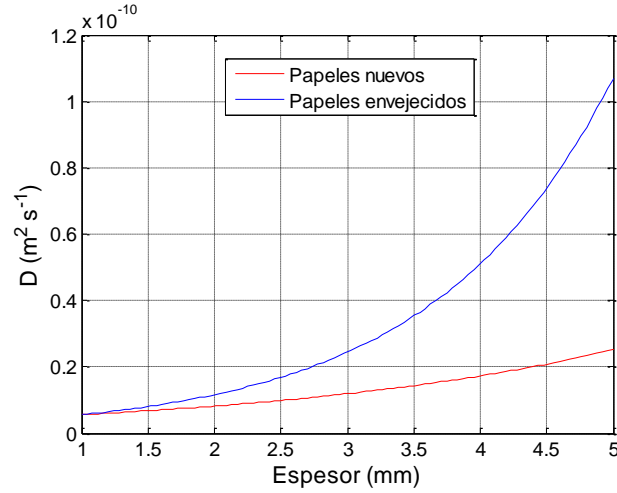


Figura 5.24 Coeficiente de difusión de humedad en función del espesor del aislamiento, calculado para una temperatura de 85 °C y una concentración de humedad de 5%.

5.6 Validación de los coeficientes de difusión propuestos

La validación de las ecuaciones propuestas en esta tesis para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados se ha realizado en dos fases. En primer lugar se calculó la distancia euclidiana entre las curvas de secado estimadas con el modelo de difusión de elementos finitos y las curvas de secado experimentales de los 45 especímenes de prueba secados durante la etapa experimental (ver Tabla D.1 del Apéndice D).

Adicionalmente se validaron las ecuaciones propuestas con los datos de las curvas de secado experimental de 12 nuevos especímenes de prueba, secados bajo condiciones distintas a las empleadas en los 45 casos iniciales.

En las dos fases de validación los secados fueron simulados mediante el modelo de elementos finitos, empleando los coeficientes propuestos y comparando los resultados obtenidos con los valores experimentales encontrados en el laboratorio. Finalmente, para ofrecer una comparación con los valores propuestos por otros autores, se han estimado las curvas de secado al emplear las ecuaciones del coeficiente de difusión de humedad para papeles impregnados propuesto por Foss (ecuación 5.19) y al usar el coeficiente propuesto por Guidi (ecuación 5.20).

$$D_{Foss} = 1,34 \times 10^{-13} \cdot e^{\left[0,5 \cdot c + 8074 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_k}\right)\right]} \quad 5.19$$

$$D_{Guidi} = 6,64 \times 10^{-14} \cdot e^{\left[0,5 \cdot c + 7700 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_k}\right)\right]} \quad 5.20$$

5.6.2 Validación usando las curvas de secado empleadas en la determinación del coeficiente de difusión de humedad

Los resultados obtenidos al simular el secado de los 45 especímenes de prueba que fueron empleados para determinar las ecuaciones del coeficiente de difusión de humedad, se muestran en las tablas 5.7 y 5.8, que corresponden con aislamientos de papel nuevo y envejecido respectivamente.

Tabla 5.11 Validación del coeficiente de difusión en especímenes de aislamiento de papel nuevo.

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$ Ecu. 5.15	$D(c, T_k, l)$ Ecu. 5.17	D_{Foss} Ecu. 5.19	D_{Guidi} Ecu. 5.20
10231	3	1,94	0,79	7,36	5,22
10350	5	0,76	1,33	6,34	3,71
10451	5	0,80	0,51	5,25	2,56
10550	5	1,93	1,28	3,75	1,27
10630	3	1,62	0,51	5,94	4,43
10730	3	1,81	0,70	5,84	4,66
10811	1	3,90	0,46	5,29	5,20
10951	3	0,76	0,55	6,63	3,75
11350	5	3,62	2,63	6,71	3,04
11451	5	6,79	5,36	4,35	1,30
11530	3	2,04	3,72	9,95	6,64
11631	3	0,73	1,99	10,10	7,06
11751	5	0,71	1,13	9,52	5,63
11850	5	0,95	1,12	9,85	5,86
11931	3	2,89	1,08	10,77	8,15
12010	1	5,02	0,68	9,04	8,18
12111	1	3,77	0,41	6,07	5,60
12211	1	3,44	0,85	5,99	5,49
14150	5	1,55	0,65	9,07	5,14
14551	5	4,35	2,65	5,98	2,08
14730	3	2,97	0,91	12,70	9,46
15051	5	1,64	0,84	7,84	4,20
15310	1	12,41	8,53	14,55	14,14

Tabla 5.12 Validación del coeficiente de difusión en especímenes de aislamiento de papel envejecido.

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$ Ecu. 5.16	$D(c, T_k, l)$ Ecu. 5.18	D_{Foss} Ecu. 5.19	D_{Guidi} Ecu. 5.20
12351	5	5,67	1,75	0,96	3,35
12451	5	5,30	0,96	1,89	2,60
12550	5	3,84	0,94	1,30	1,96
12650	5	4,73	1,43	0,90	2,62
12751	5	4,62	1,72	2,58	2,56
12851	5	4,86	1,83	2,48	2,85
12930	3	0,79	2,66	6,41	3,03
13010	1	5,67	2,92	8,23	7,07
13551	5	4,82	1,12	1,62	2,79
13651	5	4,71	1,20	1,70	2,72
13730	3	2,35	1,45	8,46	5,00
13810	1	7,63	1,20	10,19	9,03
13951	5	0,62	3,73	5,15	1,47
14050	5	1,98	6,23	8,26	4,34
14231	3	4,06	1,66	8,75	5,77
14310	1	7,70	0,96	9,23	8,46
14451	5	0,68	3,67	5,09	1,38
14630	3	4,03	1,30	9,00	6,08
14810	1	8,05	1,81	9,44	8,78
14951	5	2,24	5,67	6,86	3,48
15130	3	8,70	5,99	12,70	10,09
15210	1	10,92	5,99	11,60	11,24

Como se puede observar en las tablas anteriores, los coeficientes de difusión propuestos consiguen estimar de manera precisa la mayor parte de los casos analizados. La precisión de las distintas estimaciones se cuantifica mediante la distancia euclidiana. Exceptuando unos pocos casos, los coeficientes propuestos mejoran notablemente los resultados obtenidos al aplicar los coeficientes de Guidi y Foss.

En el caso de aislamientos de papel nuevo, se puede apreciar cómo al emplear el coeficiente de difusión de humedad de Guidi se consiguen estimaciones un poco mejores que al usar el coeficiente de Foss. En la Figura 5.25 se muestra uno de los casos simulados que corresponde con el espécimen de prueba 14150, que es un aislamiento de papel nuevo, con espesor de 5 mm, secado con aceite a una temperatura de 70 °C y sin aportación de calor desde los conductores.

En el caso de los aislamientos de papel envejecido, de nuevo la mejor estimación se obtiene al emplear el coeficiente de difusión propuesto que tiene en cuenta la dependencia con el espesor del aislamiento (ecuación 5.18). Es preciso señalar, que en este tipo de papel, al usar el coeficiente de Guidi se obtienen errores en las estimaciones similares a los que se obtienen al usar el coeficiente propuesto, no dependiente del espesor. De nuevo, al usar el coeficiente de difusión propuesto por Foss se obtienen los mayores errores en la gran parte de los casos.

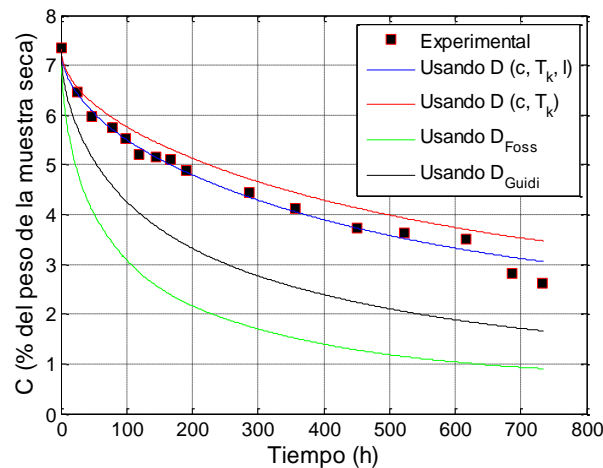


Figura 5.25 Curvas de secado experimental y simuladas del espécimen 14150.

5.6.3 Validación con curvas de secado no incluidas en la determinación del coeficiente de difusión de humedad

La segunda fase de validación se realizó con las curvas de secado experimentales de 12 especímenes de prueba. Las curvas de secado de estos 12 especímenes no fueron empleadas en la obtención de las ecuaciones propuestas del coeficiente de difusión de humedad. Las condiciones con que se secaron estos especímenes se encuentran recogidas en la Tabla 5.13.

En el primer secado (secado N° 15), se procesaron simultáneamente seis especímenes de prueba usando una temperatura del aceite diferente a las empleadas en la etapa experimental previa (85 °C). Los especímenes de prueba incluyeron aislamientos de papel nuevo y envejecido con espesores iguales a los empleados anteriormente (1 mm, 3 mm y 5 mm).

En el segundo secado (secado N° 16), se empleó una temperatura de aceite de 70 °C, correspondiente con una de las empleadas en la etapa experimental anterior. En este secado, tres de los especímenes de 1 mm, 3 mm y 5 mm tenían un

envejecimiento intermedio ($\overline{DP_v} = 572$), adquirido con un tiempo de exposición de los especímenes de aislamiento, de 25 días en el horno bajo presión de vacío, a una temperatura de 160 °C. Los otros tres especímenes de prueba con papel envejecido, tenían espesores diferentes a los empleados en la etapa experimental previa (0,5 mm, 2 mm y 4 mm).

Tabla 5.13 Especímenes empleados en la validación de los coeficientes de difusión.

Secado Nº	Código secado	Código Especimen	Tipo Papel	Espesor (mm)	T Aceite (°C)	Calentamiento interno (°C)
15	SA_2012_01_09	15450	Nuevo	5	85	SC
		15530	Nuevo	3	85	SC
		15610	Nuevo	1	85	SC
		15750	Envejecido	5	85	SC
		15830	Envejecido	3	85	SC
		15910	Envejecido	1	85	SC
16	SA_2012_01_23	16050	Intermedio	5	70	SC
		16130	Intermedio	3	70	SC
		16210	Intermedio	1	70	SC
		16340	Envejecido	4	70	SC
		16420	Envejecido	2	70	SC
		16560	Envejecido	0,5	70	SC

En las tablas 5.12 y 5.13 se presentan los resultados de las estimaciones del secado Nº 15, empleando los diferentes coeficientes de difusión de humedad. Las figuras 5.26 y 5.27 muestran las curvas de secado experimentales y estimadas de dos de estos especímenes de aislamiento.

Tabla 5.14 Validación del coeficiente de difusión, secado Nº 15, especímenes de aislamiento de papel nuevo.

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$	$D(c, T_k, l)$	D_{Foss}	D_{Guidi}
		Ecu. 5.15	Ecu. 5.17	Ecu. 5.19	Ecu. 5.20
15450	5	3,84	2,25	6,16	2,11
15530	3	0,76	2,22	7,56	4,99
15610	1	6,15	2,70	7,85	7,55

Tabla 5.15 Validación del coeficiente de difusión, secado Nº 15, especímenes de aislamiento de papel envejecido.

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$	$D(c, T_k, l)$	D_{Foss}	D_{Guidi}
		Ecu. 5.16	Ecu. 5.18	Ecu. 5.19	Ecu. 5.20
15750	5	1,03	4,86	6,28	2,47
15830	3	3,81	1,24	7,51	4,92
15910	1	7,48	2,77	8,06	7,73

De acuerdo a los resultados de las estimaciones de desorción de humedad de los especímenes probados en el secado N° 15, se puede ver como en términos generales, las estimaciones realizadas con los coeficientes de difusión propuestos presentan mejor concordancia con los resultados experimentales que al emplear los coeficientes de difusión propuestos por Guidi y Foss.

Además los coeficientes propuestos con dependencia del espesor, en especial aquellos para papeles nuevos, son los que permiten una mejor estimación de las curvas de secado.

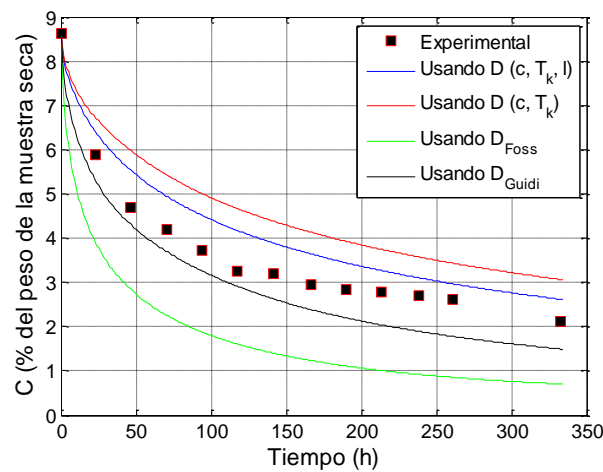


Figura 5.26 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel nuevo de 5 mm de espesor (especimen 15450).

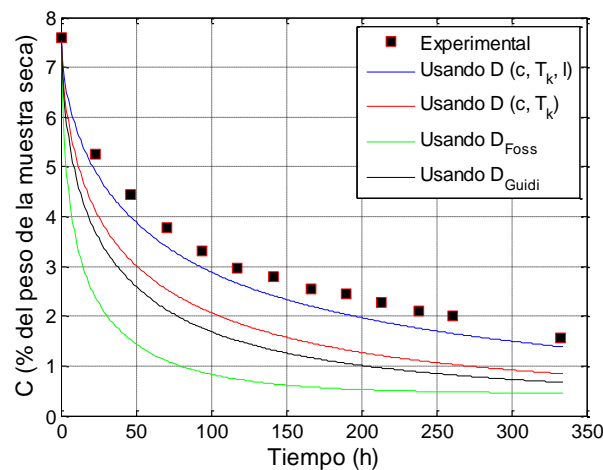


Figura 5.27 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel envejecido de 3 mm de espesor (especimen 15830).

La Tabla 5.16 presenta los resultados de la validación realizada con los especímenes de aislamiento envejecido procesados en el secado N° 16, y en la

Figura 5.28 se presentan las curvas de secado simuladas y los datos experimentales de concentración de humedad en uno de estos especímenes de prueba. De nuevo se observa que al emplear los coeficientes de difusión propuestos y en especial con aquel que considera la dependencia con el espesor, se obtienen mejores estimaciones.

Tabla 5.16 Validación del coeficiente de difusión, secado N° 16, especímenes de papel envejecido.

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$ Ecu. 5.16	$D(c, T_k, l)$ Ecu. 5.18	D_{Foss} Ecu. 5.19	D_{Guidi} Ecu. 5.20
16340	4	1,62	1,83	6,70	2,88
16420	2	4,13	2,73	8,54	6,01
16560	0,5	8,04	2,31	9,68	8,89

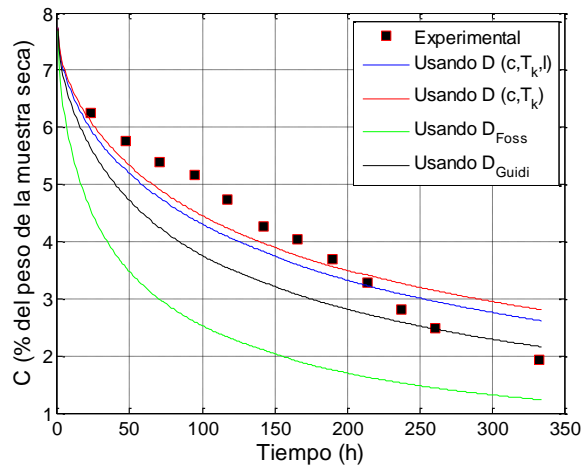


Figura 5.28 Curvas de secado experimental, aislamiento de papel envejecido de 4 mm de espesor (especimen 16340).

Las dos tablas siguientes presentan los resultados de la validación de las ecuaciones del coeficiente de difusión propuestas, empleando las curvas de secado de los especímenes de aislamiento con un envejecimiento intermedio. En la Tabla 5.17 se muestran los resultados obtenidos cuando se emplean los coeficientes propuestos para papeles nuevos y en la Tabla 5.18 los resultados cuando se emplean los coeficientes propuestos para papeles envejecidos. En las figuras 5.29 y 5.30 se presentan las curvas de secado estimadas empleando los coeficientes propuestos.

A partir de los resultados obtenidos sobre papeles con envejecimiento intermedio, se aprecia de nuevo que al emplear los coeficientes de difusión propuestos dependientes del espesor, se obtiene mejor concordancia entre las estimaciones y los

datos experimentales. Adicionalmente se observa en la Figura 5.29 como para los mayores espesores, los datos experimentales están entre las estimaciones obtenidas al usar los coeficientes propuestos para papeles nuevos y envejecidos. De igual forma se observa en la Figura 5.30 que esa diferencia se hace imperceptible para el espesor de 1 mm.

Tabla 5.17 Validación del coeficiente de difusión empleando las ecuaciones para papeles nuevos en especímenes de aislamiento con envejecimiento intermedio (Secado N° 16).

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$	$D(c, T_k, l)$	D_{Foss}	D_{Guidi}
		Ecu. 5.15	Ecu. 5.17	Ecu. 5.19	Ecu. 5.20
16050	5	4,16	3,05	5,75	2,02
16130	3	1,77	3,31	9,50	6,01
16210	1	6,97	1,97	11,00	10,23

Tabla 5.18 Validación del coeficiente de difusión empleando las ecuaciones para papeles envejecidos en especímenes de aislamiento con envejecimiento intermedio (Secado N° 16).

Código Especimen	Espesor (mm)	Distancia Euclidiana			
		$D(c, T_k)$	$D(c, T_k, l)$	D_{Foss}	D_{Guidi}
		Ecu. 5.16	Ecu. 5.18	Ecu. 5.19	Ecu. 5.20
16050	5	1,31	3,74	5,75	2,02
16130	3	3,77	1,80	9,50	6,01
16210	1	9,39	1,82	11,00	10,23

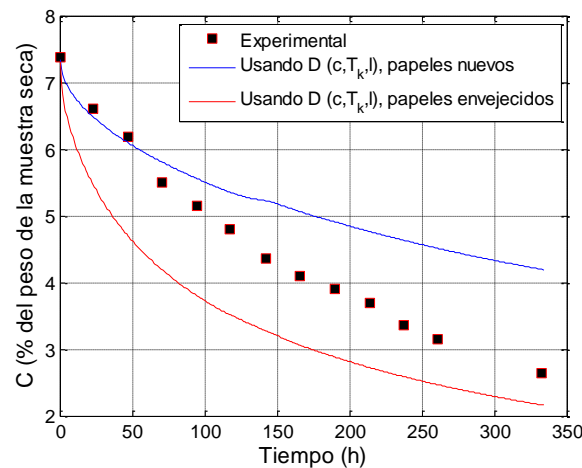


Figura 5.29 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel con envejecimiento intermedio de 5 mm de espesor (especimen 16050).

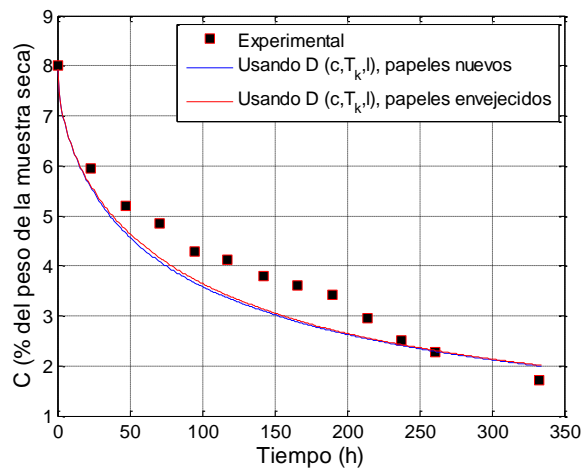


Figura 5.30 Curvas de secado experimental y simuladas, aislamiento de papel con envejecimiento intermedio de 1 mm de espesor (especimen 16210).

5.7 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la metodología seguida para la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad en papeles impregnados de aceite.

Para determinar los valores de concentración de humedad de las muestras de aislamiento durante el secado, se usó el análisis químico de Karl Fischer. Si bien este método ha sido adecuado para la medición de humedad de las muestras de aislamiento de papel impregnado, el número de datos de concentración de humedad obtenidos durante cada secado es limitado. Por esta razón, la estimación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad es menos efectiva, si se compara por ejemplo con el experimento gravimétrico en papeles sin impregnar realizado en el TGA, en el cual se tenía un registro continuo de la concentración de humedad de la muestra.

El método de Karl Fischer, requiere además el cambiar de manera momentánea las condiciones del secado para realizar la extracción de las muestras de aislamiento, lo que puede afectar de manera indirecta la posterior estimación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad.

A futuro se debería implementar un método para cuantificación del contenido de humedad del aislamiento, alternativo al análisis de Karl Fischer, con el cual sea posible realizar un mayor número de mediciones del contenido de humedad de los especímenes de aislamiento durante su secado sin alterar las condiciones del proceso

de secado, como podría ser la determinación de la humedad del aislamiento mediante las mediciones de FDS durante el secado.

El secado de los especímenes de prueba se realizó mediante circulación de aceite por ser el método de secado más empleado en campo, incluyendo los secados on-line. Adicionalmente este experimento de secado es el que más se acerca a la condición de operación del transformador, por lo cual al evaluar el secado del aislamiento bajo esta condición, se está recreando de cierta forma la dinámica de humedad del sistema papel-aceite del transformador.

Al simular en los experimentos de secado el calor aportado a los aislamientos por las corrientes circulando por los conductores, es necesario considerar en los modelos de elementos finitos una distribución no homogénea de temperatura en el aislamiento. Por ello el parámetro D_0 del coeficiente de difusión de humedad debe subdividirse en sus dos componentes (D_1 y D_2). Esto afecta directamente al proceso de optimización, de modo que en este caso se requiere encontrar ahora tres parámetros (k , D_1 y D_2), en lugar de dos (k y D_0), como ocurría en el caso de papeles no impregnados de aceite.

La dispersión en los valores de los parámetros del coeficiente de difusión, obtenidos mediante el proceso de optimización, se redujo significativamente al dar a los parámetros k y D_1 valores fijos. Esta decisión puede afectar a la correspondencia de las ecuaciones del coeficiente de difusión propuestas con la física del fenómeno de difusión de humedad, sin embargo, desde el punto de vista matemático esta opción es correcta, como se observó en la validación de las ecuaciones propuestas, en las cuales la estimación de las curvas de secado mejora respecto de la realizada al usarlos coeficientes de difusión de humedad propuestos por otros autores.

Al igual que en papeles sin impregnar, los experimentos de secado han mostrado dependencia del valor del coeficiente de difusión de humedad respecto del espesor del aislamiento. Este aspecto ha sido tenido en cuenta en las ecuaciones del coeficiente de difusión propuestas. En futuros trabajos deberían estudiarse con mayor detalle las causas que ocasionan el aumento de la movilidad de la humedad en el interior del aislamiento con el aumento de su espesor.

Otro aspecto importante evidenciado durante este estudio, es la influencia del envejecimiento de la celulosa en la movilidad del agua en el interior del aislamiento

de papel. Se ha comprobado la hipótesis inicial en la cual se preveía una mayor movilidad del agua en papeles envejecidos, lo cual se evidencia en mayores valores del coeficiente de difusión de humedad. Este aspecto no había sido tenido en cuenta en estudios de otros autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos, cabe resaltar que la influencia del envejecimiento de la celulosa en el valor del coeficiente de difusión se acrecienta en la medida que el espesor del aislamiento aumenta.

Si bien en este estudio para la determinación del coeficiente de difusión de humedad sólo se ha evaluado un grado de envejecimiento del papel, se ha mostrado que en papeles con grados de envejecimiento intermedios, es decir con un grado de polimerización medio entre 1 104 y 487, los valores reales estarán entre las estimaciones obtenidas al emplear los coeficientes de difusión para papeles nuevos y envejecidos propuestas en esta tesis.

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones generales obtenidas en la tesis. Además se resumen las principales aportaciones del trabajo, así como los futuros trabajos de investigación a los que podría dar lugar. Finalmente se relacionan las publicaciones que hasta el momento se han derivado de las investigaciones realizadas durante el desarrollo de la tesis, así como los proyectos de investigación que han financiado su desarrollo.

6.1 Conclusiones generales

6.1.1 Coeficientes de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite

Metodología para la obtención del coeficiente de difusión de humedad

En esta tesis doctoral se ha propuesto una metodología para la obtención del coeficiente de difusión de la humedad en aislamientos celulósicos de transformador sin impregnar. Dicha metodología está basada en el empleo de experimentos gravimétricos de secado y en el uso de un modelo matemático de difusión que es resuelto mediante el método de los elementos finitos.

Para la aplicación de la metodología propuesta es preciso obtener las curvas de secado de muestras del aislamiento mediante un analizador termogravimétrico (TGA), que son el punto de partida para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador no impregnados de aceite.

La utilización del TGA para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos es una técnica experimental mucho más simple y requiere equipos menos sofisticados y costosos que otras técnicas reportadas en la literatura, ofreciendo además mayor flexibilidad, alta precisión y repetibilidad en los experimentos de secado.

Una de las diferencias de la metodología propuesta respecto al trabajo realizado por otros autores es el empleo de un proceso de optimización por algoritmos genéticos en la determinación de los parámetros del coeficiente de difusión de humedad.

La determinación de los parámetros del coeficiente de difusión mediante el proceso de optimización por algoritmos genéticos propuesto presenta la ventaja de que la función objetivo no tiene que ser una función derivable. Esto permite resolver el modelo de difusión mediante la técnica de los elementos finitos en lugar de hacerlo mediante una ecuación analítica aproximada.

En contraposición se pueden apuntar dos desventajas del proceso de optimización por algoritmos genéticos: La primera es que los tiempos de convergencia requeridos para encontrar la solución mediante esta técnica son elevados. La segunda desventaja es que la optimización mediante algoritmos genéticos es un método no determinista. Este hecho hace que sea necesario aplicar el proceso varias veces y bajo condiciones diferentes para dotarlo de suficiente aleatoriedad y no sesgar la búsqueda, o evitar que ésta encuentre como resultado un mínimo local del espacio solución.

Coefficiente de difusión de humedad

Como resultado del trabajo de tesis se proponen dos ecuaciones para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite.

Para la deducción de las expresiones que proporcionan el coeficiente de difusión de humedad se han realizado experimentos de secado empleando diferentes temperaturas, espesores de aislamiento y humedades en el rango de interés para el análisis de dinámica de humedad en los transformadores de potencia.

La primera ecuación propuesta considera la dependencia del coeficiente de difusión de humedad respecto de la concentración local de humedad y la temperatura del aislamiento, de forma similar a lo realizado por otros autores. La segunda ecuación propuesta involucra además la dependencia del coeficiente de difusión de humedad con el espesor del aislamiento, aspecto que no ha sido tenido en cuenta en trabajos anteriores sobre determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador.

El aumento del valor del coeficiente de difusión de humedad con el espesor del aislamiento de papel, se evidenció a partir de los resultados experimentales. Si bien esta dependencia con el espesor no ha sido reportada en los trabajos de otros autores sobre coeficientes de difusión en aislamientos celulósicos de transformador sí ha sido evidenciada en trabajos experimentales sobre coeficientes de difusión de humedad en otros materiales sólidos, especialmente alimentos. Por el momento no existe una explicación plenamente aceptada sobre la causa de este comportamiento.

Las estimaciones de dinámica de la humedad realizadas con el modelo de difusión de elementos finitos, empleando el coeficiente de difusión de humedad con dependencia del espesor del aislamiento propuesto, presentaron, en términos generales, mejor coherencia con los datos experimentales que los obtenidos al emplear el coeficiente de difusión de humedad no dependiente del espesor propuestos por otro autor, así como el propuesto en esta tesis.

6.1.2 Coeficientes de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft impregnados de aceite

Metodología para la obtención del coeficiente de difusión de humedad

Al igual que en el caso del aislamiento de papel sin impregnar, se propone una metodología para la obtención del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos impregnados de aceite. La metodología propuesta está basada en la obtención de las curvas de secado y la aplicación de un proceso de optimización por algoritmos genéticos cuya función objetivo involucra un modelo de difusión resuelto mediante elementos finitos.

En el caso de aislamientos impregnados en aceite no sería válido aplicar un método gravimétrico. Esto se debe a que, durante el proceso de secado, una parte del aceite que impregna la muestra se evapora no siendo posible discriminar con precisión qué parte de la pérdida de peso de la muestra se debe a la desorción de humedad y cuál se debe a la evaporación del aceite.

Las curvas de secado de los especímenes de aislamiento impregnado de aceite se deberían obtener con un método de medición que no se vea afectado por el aceite con el que está impregnado el aislamiento, como por ejemplo el método de valoración culométrica de Karl Fischer.

La utilización del método de Karl Fischer tiene la ventaja de ser selectivo en cuanto a la determinación del contenido de humedad de la muestra, es decir la medida no se ve afectada por la presencia del aceite en el aislamiento. Sin embargo mediante esta técnica el número de datos de concentración de humedad con que se construye la curva de secado es limitado, lo cual puede disminuir la precisión de la estimación del coeficiente de difusión de humedad.

El emplear secados por circulación de aceite para la determinación del coeficiente de difusión de humedad, permitió evaluar la desorción de humedad en unas condiciones cercanas a las que ocurren en la operación normal del transformador, permitiendo incluso que durante los experimentos se evaluará el efecto del calor aportado desde los conductores al aislamiento.

Coefficiente de difusión de humedad

Como resultado del trabajo de tesis se proponen cuatro ecuaciones para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos de papel Kraft no impregnados de aceite.

Para la deducción de las ecuaciones del coeficiente de difusión de humedad se han realizado experimentos de secado mediante circulación de aceite caliente, empleando diferentes temperaturas, espesores de aislamiento y humedades en el rango de interés para el análisis de dinámica de humedad en los transformadores de potencia. También se ha simulado el calor aportado a los aislamientos desde los conductores del transformador.

Las ecuaciones propuestas consideran la dependencia del coeficiente de difusión de humedad respecto de la concentración local de humedad y la temperatura del aislamiento, de forma similar a lo realizado por otros autores. También se ha evaluado la dependencia del coeficiente de difusión de humedad con el espesor del aislamiento y con el envejecimiento del papel, aspectos no considerados por otros autores.

Las estimaciones de dinámica de la humedad realizadas con el modelo de difusión de elementos finitos, empleando el coeficiente de difusión de humedad con dependencia del espesor del aislamiento propuesto, presentaron, en términos generales, mucha mejor coherencia con los datos experimentales que los obtenidos al

emplear los coeficientes de difusión de humedad no dependientes del espesor propuestos por otros autores así como los propuestos en esta tesis.

Al evaluar la influencia del envejecimiento del papel en el valor del coeficiente de difusión de humedad, se encontró un aumento de este valor cuando el papel está envejecido respecto de cuando es nuevo. Este aumento en la movilidad del agua es explicado por la aparición de mayores espacios en el interior del papel, reduciéndose por tanto la tortuosidad de los caminos seguidos por la humedad en su migración, así como por la disminución de los sitios activos debida al efecto de la despolimerización de la celulosa.

En todos los casos se han estimado los coeficientes de difusión de humedad en los aislamientos de papel a partir de experimentos de secado. Si bien el comportamiento del papel ante procesos de humectación puede ser diferente, se espera que con las ecuaciones del coeficiente de difusión, propuestas en esta tesis, se logre una estimación más que aceptable de la migración de humedad en los aislamientos de papel ante procesos de humectación.

6.2 Aportaciones originales

A continuación se resumen las principales aportaciones obtenidas con el desarrollo de esta tesis.

- Se ha propuesto y evaluado una metodología experimental para la determinación del coeficiente de difusión de aislamientos celulósicos no impregnados de aceite. El método propuesto involucra experimentos gravimétricos de secado en un analizador termogravimétrico y un proceso de optimización por algoritmos genéticos cuya función objetivo incluye un modelo de difusión de humedad resuelto mediante el método de los elementos finitos.
- Se ha desarrollado y evaluado una metodología experimental para la determinación del coeficiente de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador impregnados de aceite.
- Se propone un proceso de optimización que integra la técnica de inteligencia artificial de los algoritmos genéticos y la técnica numérica de los elementos finitos. Con esta metodología ha sido posible dar solución a un problema diferencial de segundo orden de tipo no lineal.

- Se han propuesto dos ecuaciones del coeficiente de difusión de humedad de papeles Kraft no impregnados de aceite, útiles para la evaluación de los procesos de secado de transformadores en fábrica.
- Se han propuesto ecuaciones para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad de aislamientos de papel Kraft impregnado de aceite, de utilidad en el modelado del análisis de migración de humedad en aislamientos de transformadores en servicio así como en el modelado de procesos de secado en campo.
- Se proponen dos ecuaciones para el cálculo del coeficiente de humedad de aislamientos de papel Kraft impregnado de aceite teniendo en cuenta el envejecimiento del papel.
- Se ha mejorado la precisión de los modelos de simulación de migración de humedad en aislamientos de papel Kraft, al incluir la dependencia del coeficiente de difusión de humedad con el espesor del aislamiento.

6.3 Sugerencias para trabajos futuros

A continuación se mencionan algunas de las diferentes líneas de investigación que se pueden abordar en un futuro, empleando los resultados y la experiencia obtenidos durante el desarrollo de esta tesis doctoral.

- Determinación de coeficientes de difusión de aislamientos celulósicos de transformador, empleando experimentos de humectación. De esta manera se podría evaluar la histéresis de los procesos de adsorción y desorción de humedad.
- Investigar las causas de la dependencia del valor del coeficiente de difusión de humedad respecto del espesor del aislamiento.
- Aplicar las metodologías experimentales propuestas en esta tesis, a la determinación de los coeficientes de difusión de humedad en otros materiales aislantes celulósicos como cartones prensados y papeles térmicamente mejorados.
- Determinación de coeficientes de difusión de humedad en aislamientos celulósicos de transformador impregnados de otros líquidos dieléctricos como los esteres (naturales o sintéticos), cuyo uso en transformadores de potencia es un tema de creciente interés.

- Emplear los modelos de difusión propuestos junto con las ecuaciones del coeficiente de difusión obtenidas, para optimizar los procesos de secado de los transformadores de potencia.
- Desarrollo de un sensor, con el cual determinar (on-line) el contenido de humedad en aislamientos impregnados de aceite durante experimentos de secado o humectación, como alternativa al uso del análisis químico de Karl Fischer.
- Desarrollar un modelo para determinar el contenido de humedad en el papel a partir de la humedad en el aceite y el histórico de carga en el transformador.

6.4 Publicaciones y proyectos de investigación

Algunos de los resultados de la tesis han dado lugar a las siguientes publicaciones en revistas:

- D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Modeling power transformer field drying processes. *Drying Technology an International Journal* 29(8), pp. 896-909. 2011.
- D. F. García, B. García, J. C. Burgos, N. García-Hernando. Determination of moisture diffusion coefficient in transformer paper using thermogravimetric analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), pp. 1066-1075. 2012.
- D. F. García, B. García, J. C. Burgos and N. García-Hernando. Experimental determination of the diffusion coefficient of water in transformer solid insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(2), pp. 427-433. 2012.
- D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Analysis of the influence of low-frequency heating on transformer drying – Part 1: Theoretical analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 38(1), pp. 84-89. 2012.
- B. García, D. F. García, J. C. Burgos. Analysis of the influence of low-frequency heating on transformer drying – Part 2: Experiences with a real transformer. *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 38(1), pp. 90-96. 2012.

Los resultados de la tesis presentados en congresos son:

- D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Recommendations to improve the efficiency of drying processes in power transformer. XIX International Conference on Electric Machines (ICEM 2010). Realizado en Roma del 6 al 9 de septiembre de 2010.
- D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Transformer field drying improvement by applying low-frequency-heating. Workshop on Engineering Applications (WEA 2012). A realizarse en Bogotá del 2 al 4 de mayo de 2012 (en revision).
- R. Villaroel, D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Comparison of the drying times for Kraft paper and pressboard in transformer factory drying. XX International Conference on Electric Machines (ICEM 2012). A realizarse en Marsella del 2 al 5 de septiembre de 2012, (en revisión).

Esta tesis doctoral ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de los siguientes proyectos de investigación:

- Análisis de los secados de los transformadores de potencia en campo (DPI2008-01279). Desarrollado durante el año 2009.
- Optimización de los procesos de secado de transformadores de potencia en campo (DPI2009-07093). Desarrollado desde el año 2010 hasta la fecha.

Durante la investigación doctoral también se ha contado con el auspicio del Laboratorio de Ensayo de Combustibles Procedentes de la Biomasa – BIOLAB. Laboratorio perteneciente al Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid y adscrito a la red de infraestructuras y laboratorios de la Comunidad de Madrid, en donde se ha realizado gran parte de los ensayos reportados en esta tesis.

Los estudios doctorales de Diego Fernando García Gómez han sido financiados conjuntamente por la Universidad del Valle (Colombia) y la Universidad Carlos III de Madrid.

Las conclusiones prácticas de los trabajos de esta tesis que pueden ser de utilidad para la realización de secados de transformadores en campo se han recogido en el informe final de la TAREA 3: (Planificación del Mantenimiento y Alargamiento de Vida útil) del Paquete de Trabajo PTIII-4 (seguridad y disponibilidad de activos) del proyecto ENERGOS (Tecnologías para la gestión automatizada e inteligente de las redes de distribución energética del futuro) liderado por Unión Fenosa Distribución con patrocinio del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI).

Bibliografía

1. M. Abellanas. Envolvente convexa, triangulación de Delaunay y diagrama de Voronoi: Tres estructuras geométricas en una, con muchas aplicaciones. *Un Paseo Por La Geometría* 2011(12/30), pp. 16. disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/PG-06-07-Abellanas.pdf>.
2. J. A. Almendros-Ibáñez, J. C. Burgos, B. García. Transformer field drying procedures: A theoretical analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), pp. 1978-1986. 2009.
3. E. Arambula, S. Caro, P. Eyad Masad. Experimental measurement and numerical simulation of water vapor diffusion through asphalt pavement materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22, pp. 588. 2010.
4. A. S. Asem. The Drying of Power Transformer Insulation. M. Sc. Thesis, *Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham*.1981.
5. A. S. Asem, A. F. Howe. Drying of power-transformer insulation. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution* 129(5), pp. 228-232. 1982.
6. P. F. Ast, Movement of moisture through a50p281 Kraft paper (dry and oil impregnated), tech rep. General Electric. Test report HV-ER-66-41, 1966.
7. ASTM D4243 -99 (2009). Standard test method for measurement of average viscometric degree of polymerization of new and aged electrical papers and boards. *ASTM International*. 2009.
8. A. Bandyopadhyay. Moisture sorption response of paper subjected to ramp humidity changes: Modeling and experiments. *Industrial Engineering Chemistry Research* 39(1), pp. 244. 2000.

9. A. Bandyopadhyay, B. V. Ramarao, S. Ramaswamy. Transient moisture diffusion through paperboard materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 206(1-3), pp. 455-467. 2002.
10. D. Baranowski. Field processing methods for transformer dry-out. *Baron USA*, Fecha desconocida.
11. M. Bello, M. Tolaba, R. Aguerre, C. Suarez. Modeling water uptake in a cereal grain during soaking. *Journal of Food Engineering* 97(1), pp. 95-100. 2010.
12. J. Blennow, C. Ekanayake, K. Walczak, B. García, S. M. Gubanski. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics. *IEEE Transactions on Power Delivery* 21(2), pp. 681-688. 2006.
13. J. Cai, S. Chen. Determination of drying kinetics for biomass by thermogravimetric analysis under nonisothermal condition. *Drying Technology an International Journal* 26(12), pp. 1464-1468. 2008.
14. I. Cascos, A. López, J. Romo. Data depth in multivariate statistics. *Boletín De Estadística e Investigación Operativa*. 27(3), pp. 151-174. 2011.
15. M. Chaplin: Water Structure and Science. Consultado el 23. Mayo 2009, disponible en: www.lsbu.ac.uk/water/activity.html
16. Cigré Brochure 323. Aging of cellulose in mineral-oil insulated transformers. Task Force D1.01.10, Cigré, 2007.
17. Cigré Brochure 349. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems. *Working Group A2. 30*; Cigré 2008.
18. F. M. Clark. Factors affecting the mechanical deterioration of cellulose insulation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 61(10), pp. 742-749. 1942.
19. Colaboradores de Wikipedia. Ley de Fick. 2011(01/24), 2011. Disponible: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_Fick&oldid=52231948.
20. J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, USA, 1979.
21. J. Crank, G. S. Park. Diffusion in polymers. *Academic Press, London* 1968.

22. G. Csépes, I. Hámos, R. Brooks and V. Karius. Practical foundations of the RVM (recovery voltage method for oil/paper insulation diagnosis). Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998.
23. V. Dahinden, K. Schultz, A. Kuechler. The function of solid insulation in transformers. Transform 98, Munich 1988
24. M. L. Dano, J. P. Bourque. Deformation behaviour of paper and board subjected to moisture diffusion. *International Journal of Solids and Structures* 46(6), pp. 1305-1316. 2009.
25. Y. Du, M. Zahn, B. C. Lesieutre, A. V. Mamishev, S. R. Lindgren. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 15(1), pp. 11-20. 1999.
26. Y. Du. Measurements and modeling of moisture diffusion processes in transformer insulation using interdigital dielectrometry sensors. Ph.D. Thesis *Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology* 1999.
27. Y. Du, A. V. Mamishev, B. C. Lesieutre, M. Zahn. Measurement of moisture diffusion as a function of temperature and moisture concentration in transformer pressboard. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998. Annual Report 1*, pp. 341-344 vol. 1. 1998.
28. G. Efremov. Calculation of the effective diffusion coefficient in drying of polymers, fibres, and composite materials with a quasistationary method. *Fibre Chemistry* 37(1), pp. 67-72. 2005.
29. C. Ekanayake, S. M. Gubanski, A. Graczkowski, K. Walczak. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 21(3), pp. 1309-1317. 2006.
30. D. N. Ewart. *Laboratory and factory measurements of moisture in power transformers*. General Electric Company, Tech. Rep. TIS report 60PT44, 1960.
31. W. Fernando, H. Low, A. Ahmad. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of

- sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 102(4), pp. 310-316. 2011..
32. W. A. Fessler, T. O. Rouse, W. J. McNutt, O. R. Compton. A refined mathematical model for prediction of bubble evolution in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1), pp. 391-404. 1989.
 33. S. Foss. Power transformer drying model. Report Prepared for General Electric Company, Large Transformer Operation, Pittsfield, MA, and Consolidated Edison Corporation, New York, NY, by Dynamic Systems, Pittsfield, MA pp. 16-19. 1987.
 34. S. D. Foss, L. Savio. Mathematical and experimental analysis of the field drying of power transformer insulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(4), pp. 1820-1828. 1993.
 35. D. F. García, B. García, J. C. Burgos. Modeling power transformer field drying processes. *Drying Technology*, 29(8), pp. 896-909. 2011.
 36. B. García, J. C. Burgos, A. M. Alonso, J. Sanz. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), pp. 1417-1422. 2005.
 37. B. García, J. C. Burgos, A. M. Alonso, J. Sanz. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part II: Experimental verification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), pp. 1423-1429. 2005.
 38. H. Gasser, C. Krause, T. Prevost. Water absorption of cellulosic insulating materials used in power transformers. *International Conference on Solid Dielectrics, 2007. ICSD '07. IEEE* pp. 289-293. 2007.
 39. S. Gubanski, P. Boss, G. Csepes, V. Der Houhanessian, J. F. P. Guunic, U. Gafvert, V. Karius, J. Lapworth, G. Urbani, P. Werelius. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(3), pp. 12-18. 2003.
 40. W. Guidi, H. Fullerton. Mathematical methods for prediction of moisture take-up and removal in large power transformers. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1974, pp. 242-244, New York 1974.

41. H. Gupta, S. G. Chatterjee. Parallel diffusion of moisture in paper. Part 1: Steady-state conditions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(25), pp. 6582-6592. 2003.
42. H. Gupta, S. G. Chatterjee. Parallel diffusion of moisture in paper. Part 2: Transient conditions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(25), pp. 6593-6600. 2003.
43. A. Hashimoto, S. Stenström, T. Kameoka. Simulation of convective drying of wet porous materials. *Drying Technology*, 21(8), pp. 1411-1431. 2003.
44. Hedrich Vacuum Systems. Vapour phase transformer drying equipment. Consultado: 2009(07/30), 2009. <http://www.hedrich.com/index.php?id=200>.
45. Hohlein, A. J. Kachler. Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems. *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 21(5), pp. 20-24. 2005.
46. A. F. Howe. Diffusion of moisture through power-transformer insulation. *Proc. IEE* 125(10), pp. 978-986. 1978.
47. A. F. Howe. The diffusion of moisture through power transformer insulation. Ph. D Thesis, *Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham*, 1975.
48. W. Hribernik, G. Pascoli, K. Frohlich. An advanced model-based diagnosis system for online detection of the moisture content of power transformer insulations. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2008)*. 2008.
49. A. Hukka. The effective diffusion coefficient and mass transfer coefficient of Nordic softwoods as calculated from direct drying experiments. *Holzforschung* 53(5), pp. 534-540. 1999.
50. S. Ibanoglu, M. Maskan. Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture. *Journal of Food Engineering* 54(2), pp. 119-123. 2002.

51. IEEE Std 62-1995. Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus - part 1: Oil filled power transformers, regulators, and reactors. *IEEE* 1995.
52. IEEE Std C57.91-1995. Guide for loading mineral-oil-immersed transformers. *IEEE* 1996.
53. M. Ingvarsson. Diffusivity in retortable packaging materials. *Department of Chemical Engineering, Lund Institute of Technology* 2008.
54. R. B. Jadav, T. K. Saha, C. Ekanayake. Understanding moisture diffusion process in oil-impregnated pressboard insulation of transformer. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
55. R. Jeffries. The sorption of water by cellulose and eight other textile polymers. *Textile Institute Journal* 51(9), pp. 339-374. 1960.
56. C. Johnson, Numerical Solution of Partial Differential Equations by the Finite Element Method. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
57. P. T. Johnson, J. G. Brennan, F. Y. Addo-Yobo. Air-drying characteristics of plantain (musa AAB). *Journal of Food Engineering*, 37(2), pp. 233-242. 1998.
58. M. Jovalekic, D. Kolb, S. Tenbohlen, L. Bates, R. Szweczyk. A methodology for determining water saturation limits and moisture equilibrium diagrams of alternative insulation systems. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2011)*. 2011
59. A. J. Kachler, I. Hohlein. Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil. *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 21(2), pp. 15-21. 2005.
60. N. Kechaou, M. Maalej. A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology*, 18(4), pp. 1109-1125. 2000.
61. A. Ketelaars, L. Pel, W. Coumans, P. Kerkhof. Drying kinetics: A comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves. *Chemical Engineering Science* 50(7), pp. 1187-1191. 1995.

62. M. Koch, S. Tenbohlen, T. Stirl. Diagnostic application of moisture equilibrium for power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), pp. 2574-2581. 2010.
63. M. Koch, S. Tenbohlen, T. Stirl. Advanced online moisture measurements in power transformers. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2006)*, Corea. 2006.
64. P. Koestinger, E. Aronsen, P. Boss, G. Rindlisbacher. Practical experience with the drying of power transformers in the field, applying the LFH** technology. *Report A2-205, CIGRE*, 2004.
65. C. Krause, W. Goetz, B. Heinrich. The impact of drying and oil impregnation conditions and of temperature cycles on the clamping force of power transformer windings. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2002.
66. W. Lampe. Beitrag zur berechnung der notwendigen trocknungszeit von grosstransformatoren. *Archiv. Für Elektrotechnik* 53(2), pp. 121–132. 1969.
67. T. Leibfried, A. Kachler. Insulation diagnostics on power transformers using the polarisation and depolarisation current (PDC) analysis. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2002.
68. J. Leisen, B. Hojjatie, D. W. Coffin, S. A. Lavrykov, B. V. Ramarao, H. W. Beckham. Through-plane diffusion of moisture in paper detected by magnetic resonance imaging. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41(25), pp. 6555-6565. 2002.
69. W. Li, C. Gao. Establishment and application for diffusion model of moisture in drying process of pressboard. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2009)*. 2009.
70. Z. Li, N. Kobayashi. Determination of moisture diffusivity by thermo-gravimetric analysis under non-isothermal condition. *Drying Technology*, 23(6), pp. 1331-1342. 2005.

71. A. Z. Lin, H. J. Kirch, C. Krause. Modern transformer main insulation with corrugated board. *International Symposium on Electrical Insulating Materials, (ISEIM 2001)*. 2001.
72. J. Liou, S. Bruin. An approximate method for the nonlinear diffusion problem with a power relation between diffusion coefficient and concentration-I. Computation of desorption times. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(8), pp. 1209-1220. 1982.
73. J. Y. Liu, W. T. Simpson, S. P. Verrill. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. *Drying Technology*, 19(8), pp. 1555-1568. 2001.
74. L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter. Aging of oil-impregnated paper in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), pp. 230-239. 2004.
75. A. V. Mamishev. Interdigital dielectrometry sensor design and parameter estimation algorithms for non-destructive materials evaluation. . Ph. D. Thesis. *Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology*. 1999.
76. A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, M. Zahn. Interdigital sensors and transducers. *Proc IEEE* 92(5), pp. 808-845. 2004.
77. A. Maskan, S. Kaya, M. Maskan. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *Journal of Food Engineering*, 54(1), pp. 81-88. 2002.
78. MathWorks. Matlab technical documentation. Consultado, 10 de septiembre de 2009, www.mathworks.es/help/techdoc/index.html.
79. Midel. Alargar la vida del transformador. Consultado 2009(07/30), pp. 2. 2005. <http://www.midel.com/uploads/midel/documents/sales/Spanish%20Sales%20Documents/EnhancingTransformerLife.pdf>.
80. D. Mihoubi, F. Zagrouba, J. Vaxelaire, A. Bellagi, M. Roques. Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: Modeling and simulation. *Drying Technology*, 22(1-2), pp. 91-109. 2004.

81. E. Mladenov, S. Staykov, G. Cholakov. Water saturation limit of transformer oils. *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 25(1), pp. 23-30. 2009.
82. H. P. Moser, *Transformerboard*. Birkhäuser Verl., 1979.
83. D. Mu, Z. S. Liu, C. Huang, N. Djilali. Prediction of the effective diffusion coefficient in random porous media using the finite element method. *Journal of Porous Materials*, 14(1), pp. 49-54. 2007.
84. Mujumdar. *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition. CRC Press, 2007, USA.
85. R. Neimanis, R. Eriksson, R. Papazyan. Diagnosis of moisture in oil/paper distribution cables-part II: Water penetration in cable insulation-experiment and modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), pp. 15-20. 2004.
86. M. Nguyen and W. E. Price. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*, 79(1), pp. 200-207. 2007.
87. I. M. Nizovtsev, S. V. Stankus, A. N. Sterlyagov, V. I. Terekhov, R. A. Khairulin. Determination of moisture diffusivity in porous materials using gamma-method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(17-18), pp. 4161-4167. 2008.
88. T. V. Oommen. Moisture equilibrium in paper-oil systems. Conference of the Electrical/Electronics Insulation, Chicago. 1983.
89. Y. S. Park, H. N. Shin, D. H. Lee, D. J. Kim, J. H. Kim, Y. K. Lee, S. J. Sim, K. B. Choi. Drying characteristics of particles using thermogravimetric analyzer. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 20(6), pp. 1170-1175. 2003.
90. E. Pavlusová, M. Pavlus, I. Sarhadov, V. Amirkhanov, T. Puzynina, I. Puzynin. A numerical method for determination of moisture transfer coefficient according to the diffusion moisture profiles. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 5(3), pp. 282-285. 2008.
91. L. Pel, H. Brocken, K. Kopinga. Determination of moisture diffusivity in porous media using moisture concentration profiles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(6), pp. 1273-1280. 1996.

92. R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney. Perry's chemical engineers' handbook. *Mc Graw Hill, New York*, 6 ed. 1984.
93. J. D. Piper. Moisture equilibrium between gas space and fibrous materials in enclosed electric equipment. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 65(12), pp. 791-797. 1946.
94. T. A. Prevost, T. V. Oommen. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I-history and development. *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 22(1), pp. 28-35. 2006.
95. P. Przybylek. The influence of cellulose insulation aging degree on its water sorption properties and bubble evolution. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(3), pp. 906-912. 2010.
96. R. M. Radwan, R. M. El-Dewieny, I. A. Metwally. Investigation of static electrification phenomenon due to transformer oil flow in electric power apparatus. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 27(2), pp. 278-286. 1992.
97. B. Ramarao, A. Massoquete, S. Lavrykov, S. Ramaswamy. Moisture diffusion inside paper materials in the hygroscopic range and characteristics of diffusivity parameters. *Drying Technology*, 21(10), pp. 2007-2056. 2003.
98. S. Ramaswamy, B. Ramarao. 3-D characterization of the structure of paper and paperboard and their application to optimize drying and water removal processes and end-use applications. *Final Report to the US Department of Energy, DOE Project DE-FC07-00ID13873*. 2005.
99. P. Roussis. Diffusion of water vapour in cellulose acetate: 2. permeation and integral sorption kinetics. *Polymer* 22(8), pp. 1058-1063. 1981.
100. T. Saha K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 10(5), pp. 903-917. 2003.
101. T. K. Saha, P. Purkait. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 11(1), pp. 144-154. 2004.

102. G. D. Saravacos, Z. B. Maroulis. *Transport Properties of Foods* - CRC Press. 2001.
103. M. Scala. Moisture model for transformer online monitoring. *International Conference on Power Transformers, Transformer01*, Bydgoszcz (Poland), 2001.
104. M. Scala, G. Buchgraber, W. Seitlinger. Transformer overloading, utilizing an on-line thermo-hydraulic transformer model. *CIGRÉ Symposium*. Shanghai. 2003.
105. W. J. A. H. Schoeber. Regular regimes in sorption processes: calculation of drying rates and determination of concentration dependent diffusion coefficients. *Dissertation/Thesis, Technische Hogeschool Eindhoven*, 1976.
106. A. Shayegani, O. Hassan, H. Borsi, E. Gockenbach, H. Mohseni. PDC measurement evaluation on oil-pressboard samples. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2004)*. 2004.
107. W. Sonderegger, S. Hering, D. Mannes, P. Vontobel, E. Lehmann, P. Niemz. Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging. *European Journal of Wood and Wood Products*, pp. 1-10. 2010.
108. J. Świrska-Perkowska. Estimation of moisture superficial diffusivity in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1), pp. 692-697. 2011.
109. W. J. Thomas, B. D. Crittenden, *Adsorption Technology and Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford 1998.
110. J. A. Thompson. A moisture diffusion model for transformer oil and paper. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011.
111. M. A. Tutuncu and T. P. Labuza. Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), pp. 433-447. 1996.
112. UNE-EN 60450. Medida del grado de polimerización medio viscosimétrico de los materiales aislantes nuevos y envejecidos para uso eléctrico. (CEI 60450) 2005.

113. UNE-EN 60641-1. Especificaciones para papel y cartón comprimidos para usos eléctricos. Parte 1: Definiciones y requisitos generales. (EN 60641-1) (CEI 60641-1)1996.
114. UNE-EN 60641-3. Especificaciones para papel y cartón comprimidos para usos eléctricos. parte 3: Especificaciones para materiales particulares. (EN-60641-3) (CEI 60641-3) 1996.
115. UNE-EN 60814. Líquidos aislantes. papeles y cartones impregnados en aceite. determinación del contenido en agua por valoración culométrica automática de Karl Fischer. (CEI 60814) 1999.
116. G. M. Urbani, R. S. Brooks. Using the recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation. *IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (ICSD'98)*. 1998.
117. B. V. Vanin. Oil-impregnated cellulosic insulation: Moisture diffusion and equilibrium in view of interfacial adsorption water vapor by cellulose in insulation microcapillaries. *CIGRÉ Session*, París, 2000.
118. L. Wadsö, K. Svennberg, A. Dueck. An experimentally simple method for measuring sorption isotherms. *Drying Technology*, 22(10), pp. 2427-2440. 2004.
119. A. P. Washabaugh, P. A. von Guggenberg, M. Zahn, J. R. Melcher. Temperature and moisture transient flow electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation using a couette facility. *3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 867-870 vol.2. 1991.
120. V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach. Effects of different drying procedures on the composition of a liquid impregnated solid insulation. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2002.
121. V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach, I. Fofana. Drying of liquid immersed solid insulations using a hygroscopic insulating liquid. *12 Th International Symposium on High Voltage Engineering*. Bangalore, India. 2001.

- 122. M. Wilkinson, P. Dyer. Continuous moisture management: Extending transformer service life. *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2001)*. (IEE Conf. Publ no. 482). 2001.
- 123. S. Yamamoto. A short-cut method for determining concentration dependent diffusivity in liquid foods and polymer solutions from regular regime drying curves. *Drying Technology*, 19(7), pp. 1479-1490. 2001.
- 124. J. Zhang, A. Datta. Some considerations in modeling of moisture transport in heating of hygroscopic materials. *Drying Technology*, 22(8), pp. 1983-2008. 2004.
- 125. L. Zhou, G. Wu, J. Liu. Modeling of transient moisture equilibrium in oil-paper insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(3), pp. 872-878. 2008.
- 126. N. Zogzas, Z. Maroulis. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis. *Drying Technology*, 14(7-8), pp. 1543-1573. 1996.
- 127. N. Zogzas, Z. Maroulis, D. Marinos-Kouris. Moisture diffusivity methods of experimental determination a review. *Drying Technology*, 12(3), pp. 483-515. 1994.

Apéndices

Apéndice A.

Principales métodos para el secado de transformadores

A.1. Método de secado por circulación de aceite

En este método, generalmente usado en campo, se hace circular continuamente el propio aceite del transformador entre la cuba del transformador y un equipo de tratamiento externo (Figura A.1). Este método presenta la ventaja de poderse usar con el transformador energizado y operando (on-line), o con el transformador desenergizado (off-line).

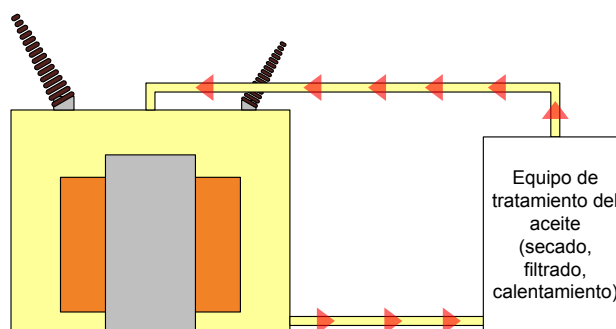


Figura A.1. Método de secado mediante circulación de aceite.

La diferencia entre las concentraciones relativas del aislamiento sólido y del aceite, el aumento del límite de saturación del aceite en simultáneo con la disminución de la capacidad de absorción de agua por parte de la celulosa al aumentar la temperatura y el aumento en la presión de vapor de agua al interior del aislamiento, son los factores que desencadenan la migración de humedad hacia el exterior de los aislamientos.

Cuando el método se aplica off-line, se aporta calor a los aislamientos por conducción desde el aceite. Esto hace poco eficiente la extracción de la humedad más interna de los aislamientos, ya que la transmisión de calor se hace en la dirección opuesta a la que toma el flujo de humedad [10].

El equipo de tratamiento se encarga de filtrar el aceite, extrayendo la humedad y las impurezas que éste tiene. Cuando el tratamiento se realiza off-line, el equipo se encarga además de calentar el aceite para que éste aporte calor a los aislamientos antes de inyectarlo de nuevo al transformador. Por otra parte, cuando el tratamiento se hace on-line, el aporte de calor a los aislamientos se realiza por las pérdidas debidas a las corrientes de carga que circulan a través de los arrollamientos y al calor generado por las pérdidas en el núcleo.

Dado que el aceite tiene poca afinidad por el agua, la velocidad de extracción de humedad de los aislamientos por este método de secado es baja. Esta es la principal desventaja de este método. Las ventajas del método son su fácil implementación, su reducida agresividad con el aislamiento celulósico y que se puede aplicar con el transformador en funcionamiento. En el caso de transformadores en servicio, sin embargo, la velocidad del secado está limitada aún más, por el riesgo dieléctrico asociado con la electrificación estática de los arrollamientos que está influenciada por factores como la humedad y la velocidad de circulación del aceite [96, 119].

A.2. Circulación de aire caliente

Este método de secado se realiza con el transformador fuera de servicio y es usado tanto en campo como en fábrica. Para llevarlo a cabo se requiere desalojar el aceite del transformador y hacer circular aire caliente y seco desde un equipo acondicionador externo (Figura A.2). La diferencia de concentración relativa de humedad entre el aire y los aislamientos celulósicos y el calor aportado por el aire, inducen la salida de humedad desde los aislamientos.

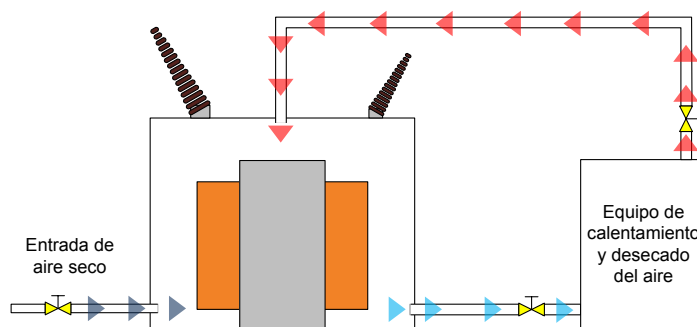


Figura A.2. Esquema del método de secado por circulación de aire caliente.

Este método tiene una velocidad de extracción de humedad mayor, comparada con la del método de circulación de aceite, ya que el aire tiene una mayor afinidad

por la humedad. Adicionalmente es aplicable en aquellos transformadores que por su estado mecánico no aceptan el empleo de vacío.

El principal inconveniente de este método, es que la presencia de oxígeno en el aire, sumada a la temperatura (que típicamente está entre 80 °C y 100 °C) acelera la degradación de la celulosa. Este método al igual que el de circulación de aceite no es eficiente extrayendo la humedad alojada en la profundidad del aislamiento [10].

A.3. Vacío con aplicación de calor

En este método se desaloja el aceite del transformador y se aplica al interior del transformador una presión inferior a la presión externa (0.8 mbar- 1.2 mbar). De esta manera se reduce la presión parcial de agua en el medio circundante al aislamiento y por tanto la condición de equilibrio en la frontera entre el aislamiento y su medio circundante se modifica. Al calentar el aislamiento se incrementa la presión de vapor de agua al interior del aislamiento, forzando la migración de humedad.

Además de requerirse para acelerar la difusión de humedad en este método también es necesaria la aportación de calor al aislamiento para evitar que el agua que ha dejado el aislamiento e incluso aquella que aún permanece en este, pase de fase gaseosa a fase líquida e incluso sólida. La aportación de calor se puede realizar mediante circulación de corriente por los arrollamientos, haciendo circular aceite caliente antes de realizar el vacío o mediante la inyección de aceite caliente en forma de spray (hot oil spray), cuando al interior del transformador ya se ha aplicado vacío.

A pesar de que el secado por vacío ofrece mayor velocidad de extracción de humedad, como desventajas se debe mencionar que la aportación de calor a los aislamientos que no están en contacto con los conductores es pobre, lo que hace que el secado de estas piezas sea más difícil [34, 35]. También la des-impregnación de aceite que sufren los aislamientos celulósicos, provoca el cambio de volumen en los mismos afectando el comportamiento de los aislamientos sólidos como soporte estructural de los devanados [65, 120]. Otra desventaja de este método es que requiere que la cuba del transformador sea capaz de soportar el nivel de vacío aplicado durante el secado, condición que no siempre se puede garantizar en el caso de transformadores en servicio. Una solución en este caso es la aplicación de un nivel de vacío moderado.

A.4. Secado por vapor de keroseno (Vapour-phase)

Este secado consiste en someter a vacío los aislamientos del transformador y luego aplicar vapor de keroseno caliente a una temperatura entre 150 y 180 °C [122]. El vapor de keroseno calienta los aislamientos celulósicos forzando la migración de la humedad hacia el exterior de los mismos. La mezcla de vapor de keroseno y agua es llevada afuera de la cámara de vacío y el agua es condensada para su extracción. La Figura A.3 presenta el esquema de una instalación para el secado de transformadores por vapor de keroseno.

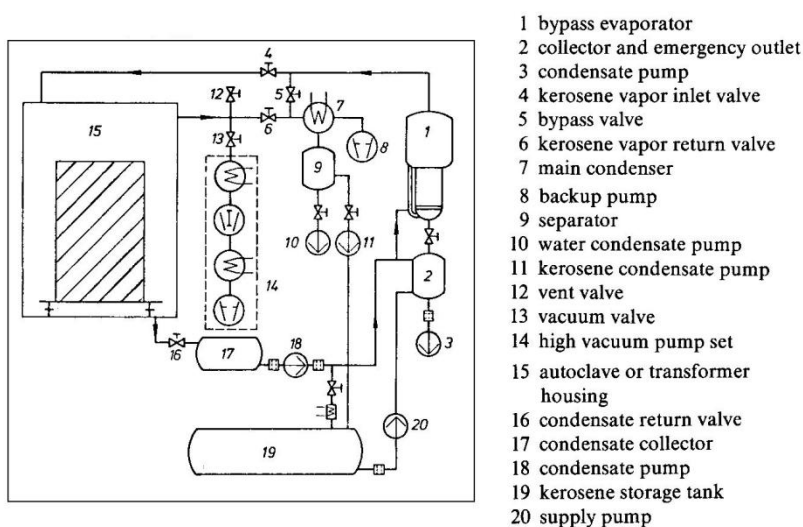


Figura A.3. Esquema de una instalación de secado por vapour-phase, tomado de [82].

Debido a la alta conductividad térmica del keroseno, la transferencia térmica hacia los aislamientos durante el secado es mayor, lo que posibilita que la velocidad de extracción de agua sea alta. Como el proceso de secado se realiza bajo vacío la no presencia de oxígeno también permite emplear temperaturas más altas.

La desventaja principal de este método es que debido a los equipos requeridos su uso práctico ha estado limitado principalmente a secados en fábrica, aunque en la actualidad ya existen equipos portátiles para realizar secados en campo [44].

Apéndice B.

Curvas de secado de aislamiento de papel sin impregnar

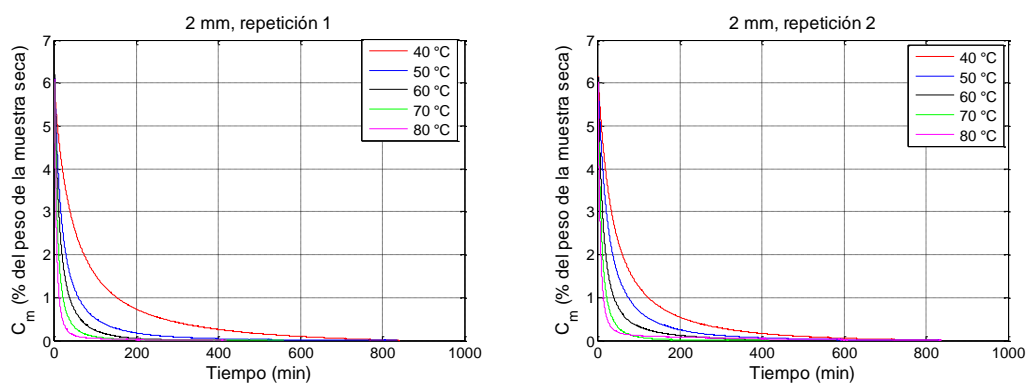


Figura B.1. Curvas de secado, aislamiento de 2 mm.

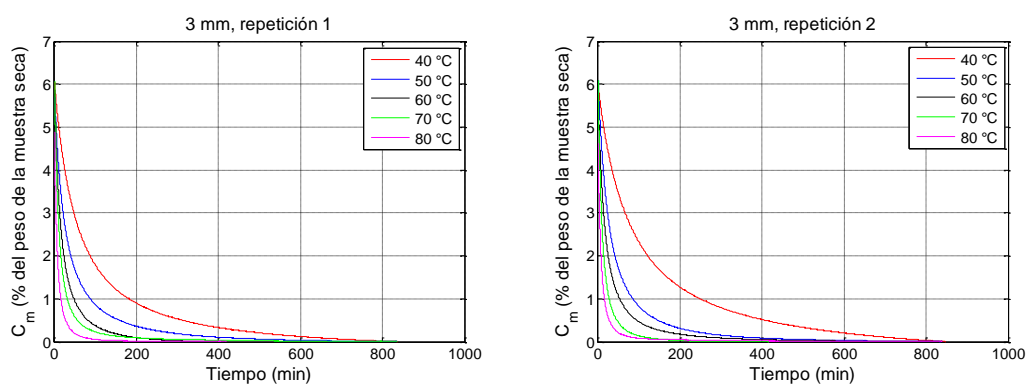


Figura B.2. Curvas de secado, aislamiento de 3 mm.

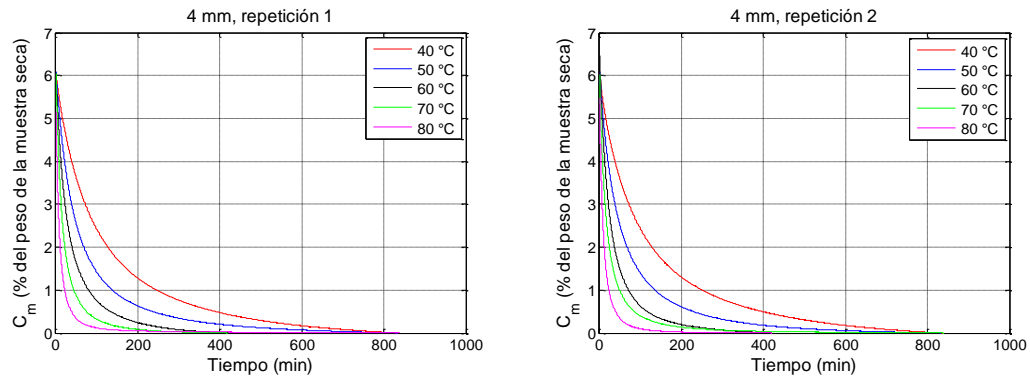


Figura B.3. Curvas de secado, aislamiento de 4 mm.

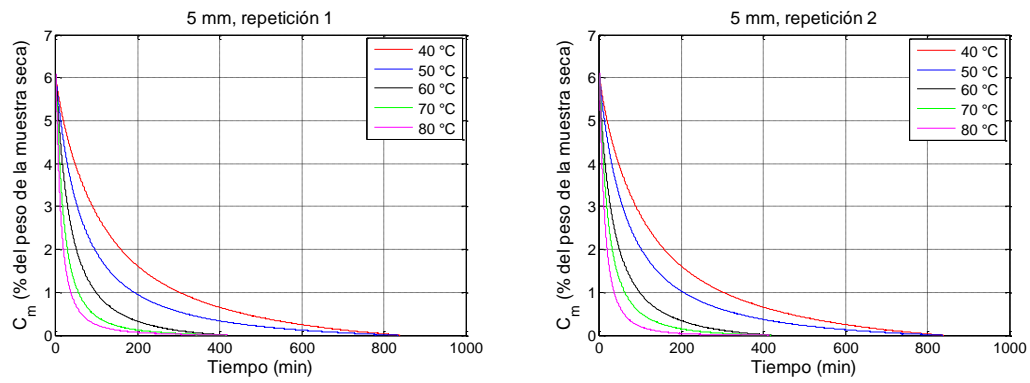


Figura B.4. Curvas de secado, aislamiento de 5 mm.

Apéndice C.

Valores de k y D_0 para papeles sin impregnar

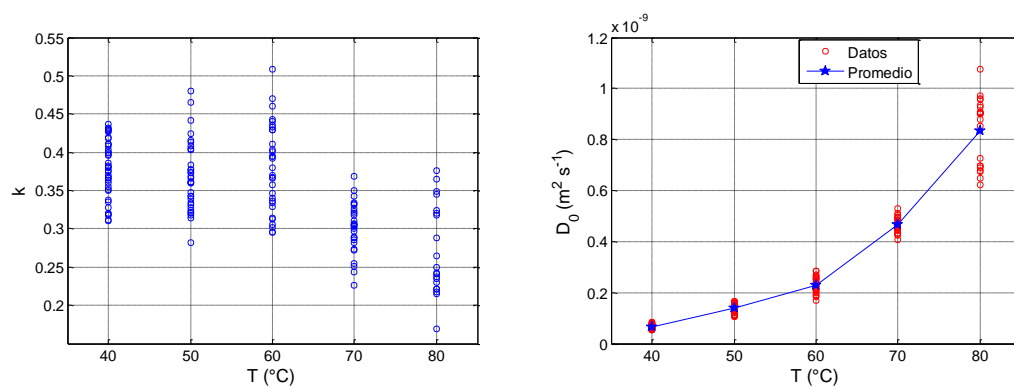


Figura C.1. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 2 mm de espesor.

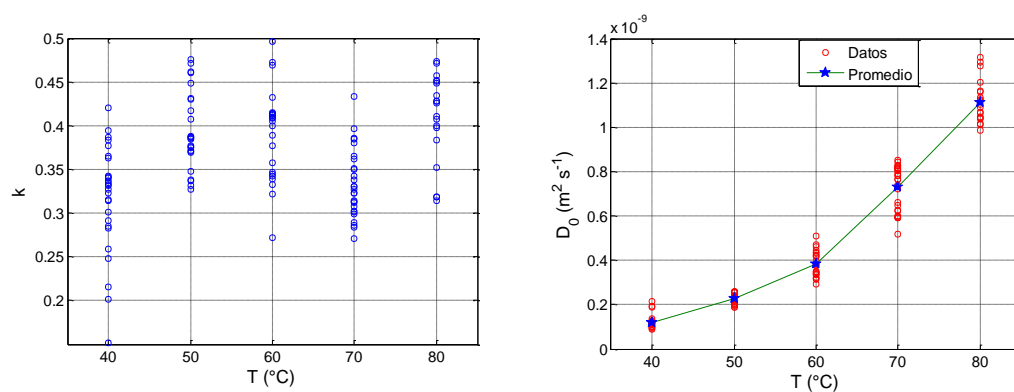


Figura C.2. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 3 mm de espesor.

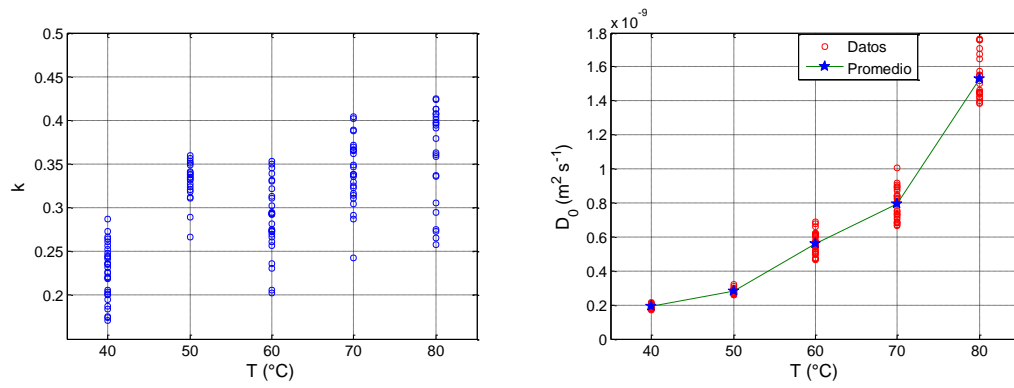


Figura C.3. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 4 mm de espesor.

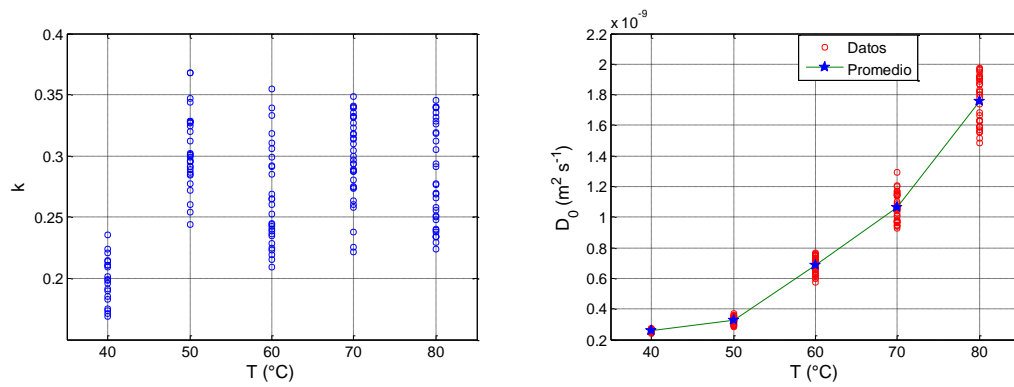


Figura C.4. Valores de k y D_0 en función de la temperatura, aislamiento de 5 mm de espesor.

Apéndice D.

Experimentos de secado en especímenes de prueba de papel impregnado

D.1. Condiciones de los secados realizados

Tabla D.1. Condiciones de los secados bajo circulación de aceite realizados.

Secado No	Código secado	Código Especimen	Tipo Papel	Espesor (mm)	T Aceite (°C)	Calentamiento interno (°C)
1	SA_2010_09_13	10231	Nuevo	3	80	90
		10350	Nuevo	5	80	SC
		10451	Nuevo	5	80	90
2	SA_2010_09_24	10550	Nuevo	5	80	SC
3	SA_2010_10_01	10630	Nuevo	3	80	SC
4	SA_2010_10_13	10730	Nuevo	3	80	SC
5	SA_2010_11_05	10811	Nuevo	1	70	80
		10951	Nuevo	5	70	80
6	SA_2010_12_17	11350	Nuevo	5	60	SC
		11451	Nuevo	5	60	80
		11530	Nuevo	3	60	SC
		11631	Nuevo	3	60	80
7	SA_2011_01_14	11751	Nuevo	5	70	90
		11850	Nuevo	5	70	SC
		11931	Nuevo	3	70	90
		12010	Nuevo	1	70	SC
8	SA_2011_02_09	12111	Nuevo	1	60	90
		12211	Nuevo	1	60	90
9	SA_2011_03_04	12351	Envejecido	5	60	70
		12451	Envejecido	5	60	70
		12550	Envejecido	5	60	SC
		12650	Envejecido	5	60	SC
10	SA_2011_04_25	12751	Envejecido	5	60	85
		12851	Envejecido	5	60	85
		12930	Envejecido	3	60	SC
		13010	Envejecido	1	60	SC
11	SA_2011_06_14	13551	Envejecido	5	60	100
		13651	Envejecido	5	60	100
		13730	Envejecido	3	60	SC
		13810	Envejecido	1	60	SC
12	SA_2011_07_14	13951	Envejecido	5	70	85
		14050	Envejecido	5	70	SC
		14150	Nuevo	5	70	SC
		14231	Envejecido	3	70	85
		14310	Envejecido	1	70	SC
13	SA_2011_08_19	14451	Envejecido	5	70	100
		14551	Nuevo	5	70	100
		14630	Envejecido	3	70	SC
		14730	Nuevo	3	70	SC
		14810	Envejecido	1	70	SC
14	SA_2011_09_19	14951	Envejecido	5	80	100
		15051	Nuevo	5	80	100
		15130	Envejecido	3	80	SC
		15210	Envejecido	1	80	SC
		15310	Nuevo	1	80	SC

SC: No se emuló calentamiento desde el conductor

D.2. Medición de temperatura de la cara externa del aislamiento

Tabla D.2. Temperaturas medidas en la cara externa del aislamiento para las diferentes condiciones de secado evaluadas.

T_{oil} (°C)	T_{in} (°C)	T_{ex} (°C)		
		5 mm	3 mm	1 mm
60	70	62,8	63,3	63,9
	80	65,0	67,0	69,3
	85	65,9	68,8	72,3
	90	66,6	70,6	74,7
	100	68,9	74,1	79,2
70	80	73,4	73,5	74,0
	85	74,2	75,4	76,4
	90	75,0	77,2	79,7
	100	76,8	80,9	85,1
80	90	83,2	83,5	86,0
	100	85,4	86,7	90,8

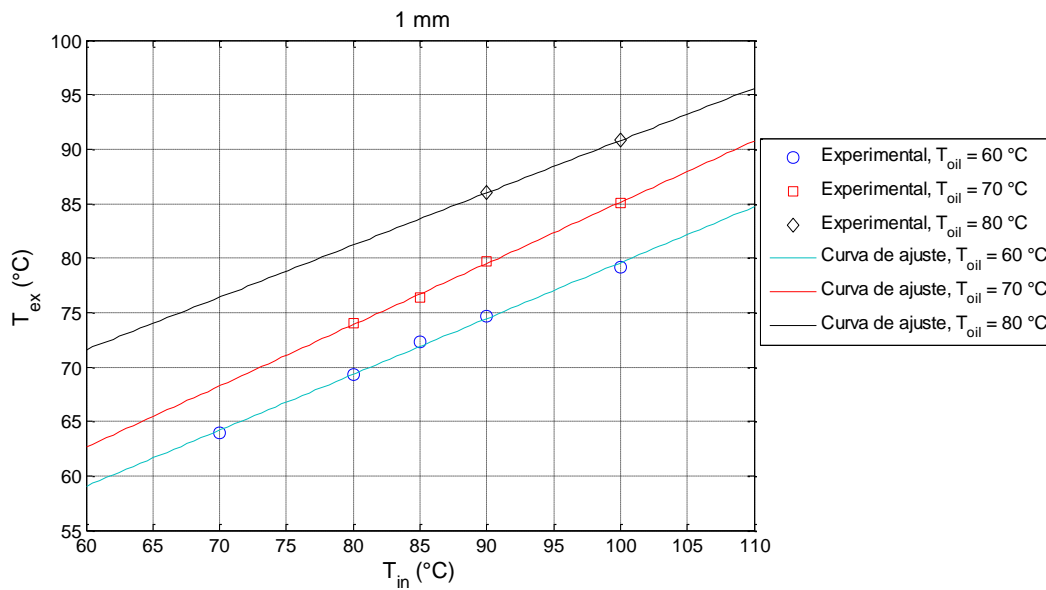


Figura D.1. Aislamiento de 1 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in} .

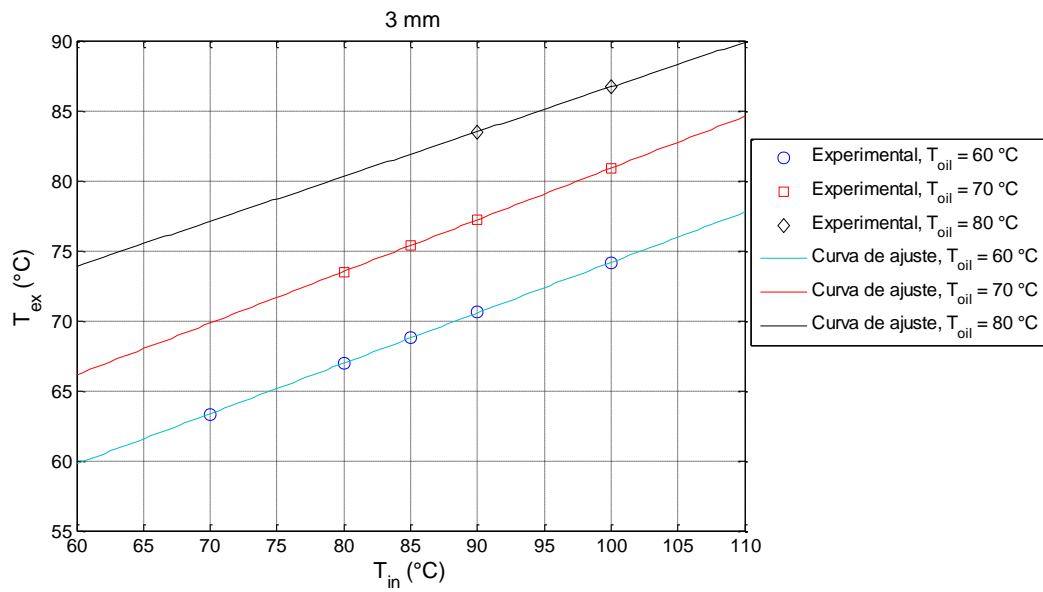


Figura D.2. Aislamiento de 3 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in} .

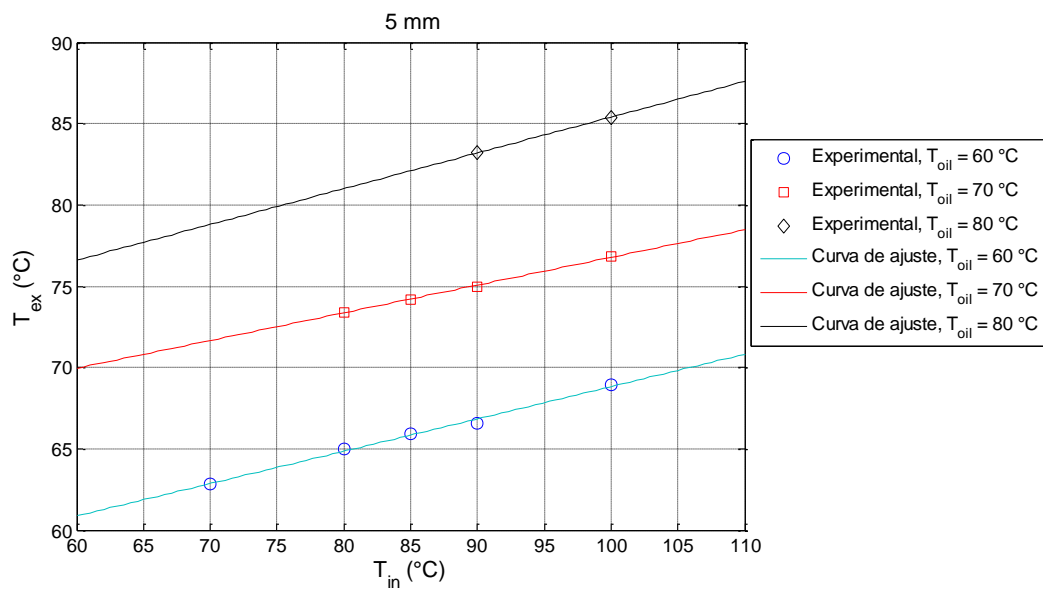
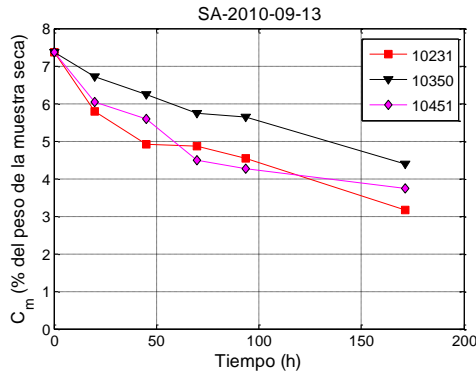
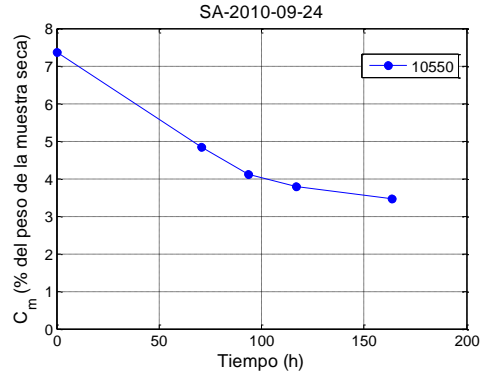


Figura D.3. Aislamiento de 5 mm. Datos experimentales y curvas de ajuste T_{ex} frente a T_{in} .

D.3. Curvas de secado de los especímenes de prueba de papeles impregnados

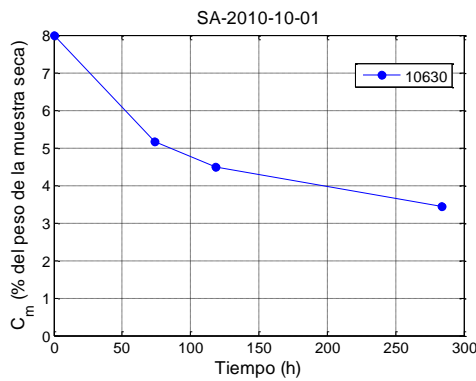


Secado No 1

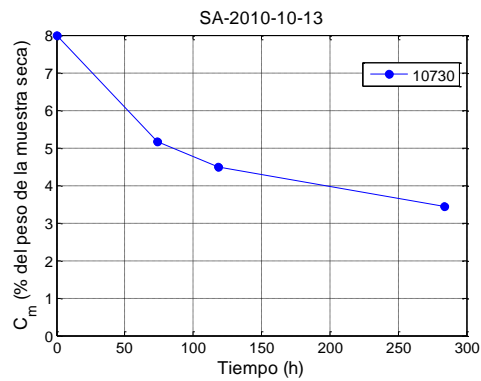


Secado No 2

Figura D.4. Curvas de secado, secados 1 y 2.

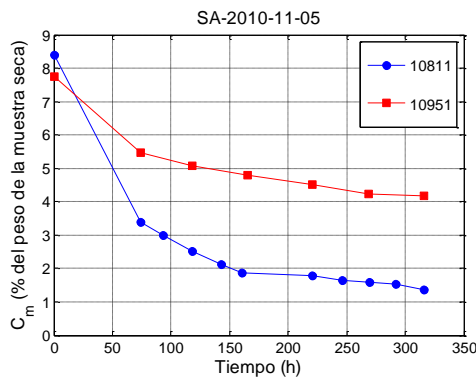


Secado No 3

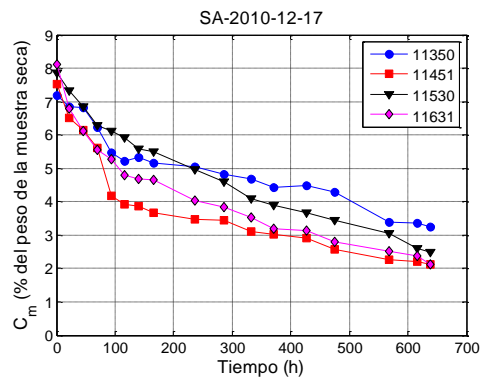


Secado No 4

Figura D.5. Curvas de secado, secados 3 y 4.

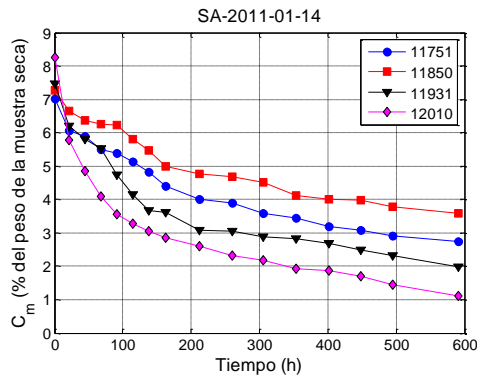


Secado No 5

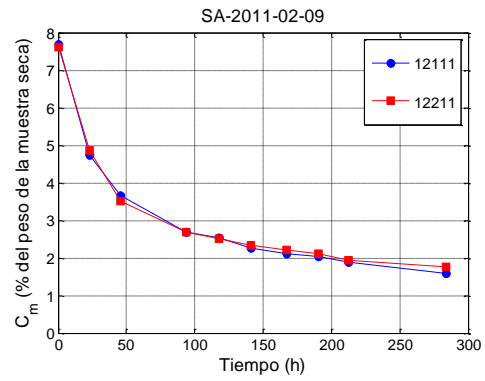


Secado No 6

Figura D.6. Curvas de secado, secados 5 y 6.

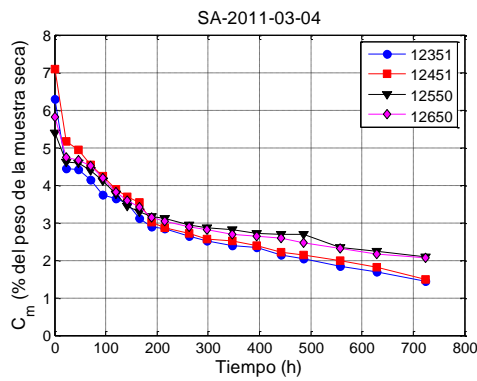


Secado No 7

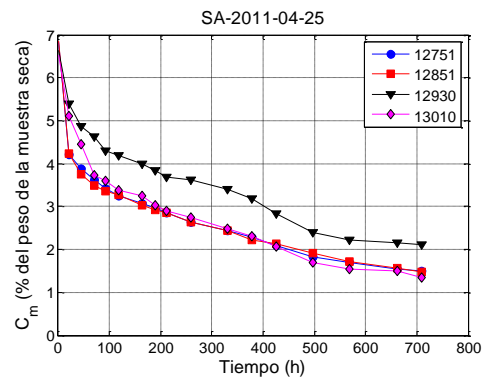


Secado No 8

Figura D.7. Curvas de secado, secados 7 y 8.

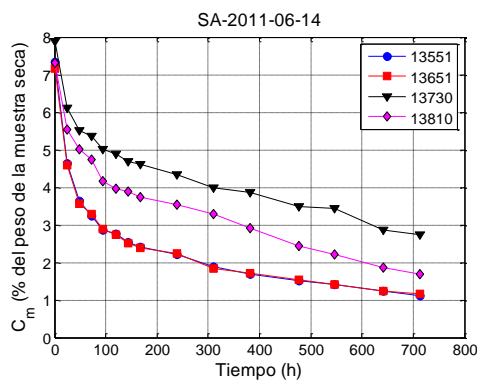


Secado No 9

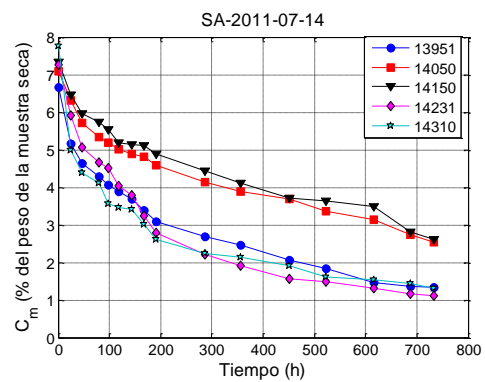


Secado No 10

Figura D.8. Curvas de secado, secados 9 y 10.

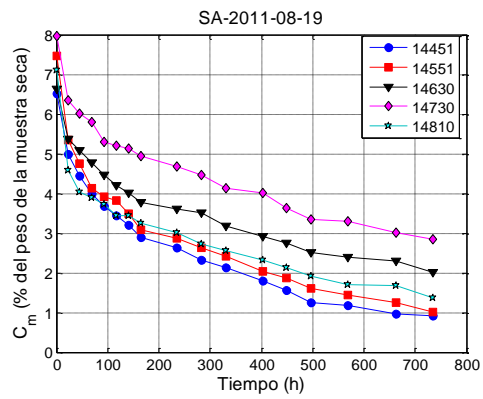


Secado No 11

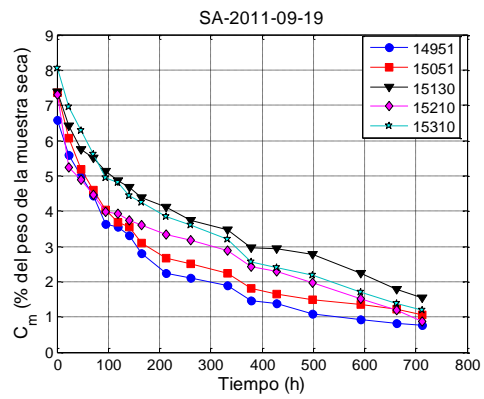


Secado No 12

Figura D.9. Curvas de secado, secados 11 y 12.



Secado No 13



Secado No 14

Figura D.10. Curvas de secado, secados 13 y 14.

Apéndice E.

Análisis estadístico de los parámetros del coeficiente de difusión de papeles impregnados

E.1. Descripción de los casos combinados

Tabla E.1. Descripción de los casos de poblaciones combinadas analizados.

Caso No	Espesor (mm)	Tipo de papel		Emulación de calor		No datos
		Nuevo	Envejecido	Sin	Con	
1	1,3,5	x	x	x	x	6575
2	1,3,5	x		x	x	2675
3	1,3,5		x	x	x	3900
4	1,3,5	x	x	x		3617
5	1,3,5	x	x		x	2958
6	1,3,5	x		x		1320
7	1,3,5	x			x	1355
8	1,3,5		x	x		2297
9	1,3,5		x		x	1603
10	1	x	x	x	x	1604
11	1	x		x	x	682
12	1		x	x		922
13	1	x	x	x		1341
14	1	x			x	263
15	1	x		x		419
16	3	x	x	x	x	1686
17	3	x		x	x	729
18	3		x	x	x	957
19	3	x	x	x		1228
20	3	x	x		x	458
21	3	x		x		408
22	3	x			x	321
23	3		x	x		820
24	3		x		x	137
25	5	x	x	x	x	3285
26	5	x		x	x	1264
27	5		x	x	x	2021
28	5	x	x	x		1048
29	5	x	x		x	2237
30	5	x		x		493
31	5	x			x	771
32	5		x	x		555
33	5		x		x	1466

E.2. Análisis descriptivo casos individuales

Tabla E.2. Análisis descriptivo parámetro k, para los distintos especímenes de prueba.

Código	No datos	Media	Mediana	D. std	Varianza	C. de variación	C. de asimetría	Curtosis	Curtosis std.	Sesgo	Sesgo std.	Min	Max	Rango
10231	76	0,339	0,261	0,191	0,036	56,29	0,95	0,07	0,13	0,97	3,45	0,119	0,878	0,759
10350	82	0,308	0,262	0,190	0,036	61,67	1,62	2,55	4,71	1,65	6,12	0,101	0,923	0,822
10451	94	0,554	0,542	0,160	0,026	28,86	0,31	0,02	0,04	0,32	1,26	0,168	0,947	0,778
10550	83	0,365	0,313	0,210	0,044	57,47	0,99	0,52	0,96	1,01	3,75	0,113	0,982	0,869
10630	85	0,654	0,661	0,139	0,019	21,28	-0,46	0,93	1,75	-0,47	-1,77	0,198	0,981	0,783
10730	94	0,651	0,659	0,154	0,024	23,66	-0,68	1,55	3,07	-0,69	-2,72	0,107	0,972	0,865
10811	88	0,528	0,513	0,114	0,013	21,55	0,55	0,55	1,06	0,55	2,12	0,241	0,873	0,632
10951	85	0,797	0,860	0,168	0,028	21,04	-1,70	2,96	5,58	-1,73	-6,53	0,194	0,979	0,785
11350	85	0,174	0,153	0,075	0,006	43,42	2,45	9,30	17,49	2,49	9,38	0,100	0,573	0,472
11451	100	0,485	0,480	0,059	0,003	12,12	0,44	0,38	0,77	0,44	1,82	0,366	0,695	0,329
11530	56	0,114	0,109	0,014	0,000	12,14	1,18	1,17	1,79	1,21	3,70	0,100	0,162	0,062
11631	84	0,382	0,382	0,105	0,011	27,60	0,00	-0,20	-0,38	0,00	0,00	0,113	0,597	0,484
11751	78	0,348	0,350	0,124	0,015	35,55	0,58	0,09	0,17	0,59	2,14	0,156	0,727	0,571
11850	82	0,266	0,236	0,120	0,014	44,94	1,09	0,84	1,54	1,11	4,10	0,106	0,622	0,517
11931	76	0,446	0,444	0,046	0,002	10,39	0,12	1,55	2,77	0,12	0,43	0,309	0,597	0,288
12010	96	0,507	0,493	0,080	0,006	15,85	-0,12	-0,10	-0,20	-0,13	-0,50	0,309	0,680	0,370
12111	93	0,650	0,641	0,111	0,012	17,00	-0,01	1,25	2,46	-0,01	-0,02	0,296	0,948	0,652
12211	82	0,657	0,655	0,114	0,013	17,29	-0,24	1,27	2,35	-0,24	-0,89	0,350	0,981	0,631
12351	197	0,469	0,479	0,106	0,011	22,69	-0,54	1,20	3,44	-0,54	-3,11	0,106	0,798	0,692
12451	199	0,405	0,400	0,081	0,007	20,12	0,34	0,74	2,12	0,35	1,99	0,209	0,714	0,505
12550	205	0,395	0,387	0,138	0,019	34,80	0,64	1,04	3,05	0,65	3,78	0,129	0,925	0,796
12650	211	0,384	0,361	0,128	0,016	33,37	0,86	1,58	4,70	0,87	5,15	0,144	0,897	0,753
12751	20	1,010	0,976	0,099	0,010	9,83	1,49	1,41	1,28	1,61	2,95	0,930	1,265	0,335
12851	20	1,028	0,984	0,103	0,011	10,03	1,35	1,20	1,09	1,47	2,68	0,923	1,300	0,378
12930	211	0,617	0,631	0,119	0,014	19,23	-1,32	4,31	12,77	-1,33	-7,91	0,103	0,933	0,830
13010	198	0,622	0,633	0,095	0,009	15,26	-0,32	1,33	3,81	-0,33	-1,88	0,296	0,947	0,651
13551	171	0,836	0,837	0,059	0,003	7,04	-0,18	-0,45	-1,19	-0,18	-0,95	0,640	0,943	0,303
13651	201	0,854	0,847	0,058	0,003	6,85	0,33	0,20	0,59	0,33	1,91	0,690	0,991	0,301
13730	86	0,897	0,894	0,058	0,003	6,47	-0,21	-0,49	-0,93	-0,21	-0,81	0,748	0,999	0,252
13810	85	0,635	0,631	0,055	0,003	8,71	0,01	-1,13	-2,13	0,01	0,04	0,527	0,737	0,210
13951	140	0,427	0,417	0,073	0,005	17,00	0,14	-0,27	-0,66	0,14	0,66	0,239	0,595	0,356
14050	139	0,395	0,403	0,115	0,013	29,04	-0,22	-0,59	-1,42	-0,22	-1,08	0,118	0,649	0,531
14150	161	0,278	0,271	0,104	0,011	37,32	0,28	-0,76	-1,96	0,28	1,46	0,101	0,557	0,456
14231	137	0,212	0,198	0,063	0,004	29,55	0,56	-0,49	-1,18	0,57	2,71	0,107	0,353	0,246
14310	137	0,686	0,683	0,055	0,003	8,08	0,02	0,05	0,13	0,02	0,08	0,555	0,816	0,261
14451	193	0,419	0,422	0,068	0,005	16,15	-0,18	0,06	0,18	-0,18	-1,02	0,216	0,583	0,368
14551	179	0,572	0,574	0,049	0,002	8,53	0,01	-0,75	-2,06	0,01	0,06	0,468	0,691	0,224
14630	196	0,640	0,647	0,080	0,006	12,50	-0,37	1,32	3,79	-0,38	-2,15	0,334	0,876	0,542
14730	173	0,695	0,698	0,065	0,004	9,31	-0,08	-0,82	-2,20	-0,09	-0,46	0,538	0,841	0,303
14810	180	0,930	0,932	0,047	0,002	5,07	-0,80	1,32	3,61	-0,81	-4,45	0,720	1,000	0,279
14951	325	0,173	0,166	0,048	0,002	27,49	0,34	-1,03	-3,79	0,34	2,49	0,101	0,285	0,185
15051	320	0,328	0,332	0,062	0,004	19,03	-0,08	-0,35	-1,28	-0,08	-0,61	0,159	0,496	0,336
15130	327	0,184	0,177	0,056	0,003	30,50	0,54	-0,48	-1,76	0,55	4,03	0,100	0,379	0,279
15210	322	0,457	0,453	0,050	0,003	11,04	0,16	-0,16	-0,60	0,16	1,19	0,324	0,611	0,287
15310	323	0,151	0,140	0,040	0,002	26,56	0,93	0,30	1,10	0,94	6,87	0,100	0,288	0,188

Tabla E.3. Análisis descriptivo parámetro D1, para los distintos especímenes de prueba.

Código	No datos	Media	Mediana	D. std	Varianza	C. de variación	C. de asimetría	Curtosis	Curtosis std.	Sesgo	Sesgo std.	Min	Max	Rango
10231	76	0,536	0,549	0,215	0,046	40,14	-0,07	-0,63	-1,12	-0,07	-0,26	0,119	0,993	0,875
10350	82	0,489	0,497	0,226	0,051	46,21	0,13	-0,87	-1,60	0,13	0,50	0,072	0,899	0,828
10451	94	0,482	0,461	0,239	0,057	49,49	0,21	-0,86	-1,70	0,21	0,85	0,021	0,967	0,946
10550	83	0,517	0,499	0,259	0,067	50,19	-0,10	-1,23	-2,30	-0,10	-0,38	0,064	0,948	0,884
10630	85	0,420	0,391	0,236	0,056	56,31	0,48	-0,77	-1,44	0,49	1,84	0,018	0,991	0,974
10730	94	0,547	0,613	0,216	0,047	39,50	-0,34	-0,93	-1,84	-0,35	-1,37	0,098	0,973	0,875
10811	88	0,463	0,425	0,217	0,047	46,81	0,32	-0,62	-1,18	0,33	1,26	0,041	0,986	0,945
10951	85	0,490	0,444	0,233	0,054	47,59	0,19	-1,00	-1,89	0,20	0,75	0,019	0,969	0,950
11350	85	0,550	0,582	0,219	0,048	39,82	-0,11	-1,27	-2,38	-0,11	-0,41	0,118	0,893	0,775
11451	100	0,547	0,583	0,216	0,047	39,53	-0,45	-0,83	-1,69	-0,45	-1,86	0,106	0,898	0,791
11530	56	0,581	0,632	0,219	0,048	37,74	-0,17	-0,98	-1,49	-0,17	-0,52	0,169	0,953	0,785
11631	84	0,486	0,474	0,260	0,068	53,53	0,12	-1,13	-2,12	0,12	0,45	0,036	0,978	0,942
11751	78	0,562	0,595	0,221	0,049	39,31	-0,38	-0,78	-1,40	-0,38	-1,38	0,079	0,955	0,877
11850	82	0,480	0,479	0,223	0,050	46,46	0,07	-1,12	-2,07	0,08	0,28	0,110	0,991	0,881
11931	76	0,558	0,551	0,236	0,056	42,31	-0,01	-1,22	-2,17	-0,01	-0,04	0,103	0,956	0,853
12010	96	0,477	0,454	0,256	0,066	53,67	0,22	-1,13	-2,27	0,22	0,90	0,056	0,986	0,930
12111	93	0,551	0,555	0,235	0,055	42,61	-0,28	-1,05	-2,07	-0,28	-1,12	0,037	0,933	0,896
12211	82	0,474	0,456	0,268	0,072	56,50	0,17	-1,25	-2,30	0,18	0,65	0,051	0,969	0,919
12351	197	0,485	0,480	0,239	0,057	49,40	0,14	-1,16	-3,33	0,14	0,83	0,059	0,988	0,929
12451	199	0,508	0,476	0,225	0,051	44,43	0,15	-1,02	-2,95	0,15	0,85	0,103	0,988	0,885
12550	205	0,518	0,516	0,245	0,060	47,33	-0,08	-1,30	-3,79	-0,08	-0,50	0,123	0,976	0,852
12650	211	0,545	0,585	0,228	0,052	41,76	-0,34	-0,89	-2,65	-0,34	-2,04	0,020	0,972	0,952
12751	20	0,477	0,517	0,269	0,072	56,34	-0,14	-1,31	-1,20	-0,15	-0,27	0,101	0,888	0,787
12851	20	0,531	0,496	0,237	0,056	44,61	-0,05	-1,32	-1,20	-0,05	-0,09	0,104	0,864	0,760
12930	211	0,510	0,510	0,252	0,064	49,51	0,00	-1,32	-3,90	0,00	0,02	0,096	0,973	0,877
13010	198	0,480	0,469	0,219	0,048	45,55	0,05	-1,03	-2,96	0,05	0,30	0,039	0,894	0,854
13551	171	0,493	0,509	0,225	0,051	45,74	-0,12	-1,26	-3,38	-0,12	-0,66	0,105	0,880	0,775
13651	201	0,547	0,528	0,242	0,058	44,23	-0,23	-1,32	-3,82	-0,24	-1,36	0,123	0,888	0,765
13730	86	0,508	0,514	0,215	0,046	42,30	0,07	-1,34	-2,53	0,07	0,28	0,168	0,898	0,730
13810	85	0,485	0,447	0,223	0,050	45,96	0,12	-1,38	-2,59	0,12	0,46	0,126	0,862	0,735
13951	140	0,507	0,508	0,227	0,052	44,79	0,06	-1,18	-2,86	0,06	0,27	0,124	0,899	0,775
14050	139	0,519	0,509	0,241	0,058	46,41	0,11	-1,32	-3,19	0,11	0,52	0,112	0,899	0,787
14150	161	0,527	0,554	0,225	0,051	42,70	-0,11	-1,10	-2,85	-0,12	-0,60	0,101	0,899	0,798
14231	137	0,514	0,545	0,217	0,047	42,25	-0,27	-0,95	-2,28	-0,27	-1,30	0,101	0,895	0,794
14310	137	0,496	0,480	0,220	0,048	44,38	-0,08	-1,19	-2,84	-0,08	-0,40	0,119	0,888	0,768
14451	193	0,500	0,512	0,221	0,049	44,18	-0,02	-1,09	-3,10	-0,02	-0,11	0,110	0,895	0,785
14551	179	0,499	0,507	0,214	0,046	42,99	-0,05	-1,09	-2,99	-0,05	-0,27	0,112	0,897	0,786
14630	196	0,489	0,465	0,227	0,052	46,47	0,15	-1,15	-3,28	0,15	0,86	0,103	0,894	0,792
14730	173	0,509	0,511	0,228	0,052	44,87	-0,09	-1,11	-2,98	-0,09	-0,51	0,109	0,893	0,784
14810	180	0,499	0,502	0,220	0,048	44,02	-0,03	-1,12	-3,06	-0,03	-0,14	0,105	0,889	0,784
14951	325	0,515	0,521	0,225	0,051	43,64	-0,11	-1,23	-4,53	-0,12	-0,85	0,102	0,899	0,797
15051	320	0,501	0,519	0,221	0,049	44,25	-0,06	-1,03	-3,75	-0,06	-0,41	0,101	0,899	0,798
15130	327	0,505	0,528	0,230	0,053	45,68	-0,10	-1,21	-4,47	-0,10	-0,71	0,100	0,896	0,796
15210	322	0,516	0,524	0,227	0,052	44,02	-0,02	-1,20	-4,40	-0,02	-0,12	0,102	0,892	0,790
15310	323	0,530	0,555	0,225	0,050	42,37	-0,19	-1,03	-3,77	-0,19	-1,43	0,100	0,898	0,797

Tabla E.4. Análisis descriptivo parámetro D2, para los distintos especímenes de prueba.

Código	No datos	Media	Mediana	D. std	Varianza	C. de variación	C. de asimetría	Curtosis	Curtosis std.	Sesgo	Sesgo std.	Min	Max	Rango
10231	76	9514,9	9499,2	306,1	93716,6	3,22	0,23	0,77	1,36	0,23	0,83	8792,8	10398,6	1605,9
10350	82	9271,4	9274,1	360,2	129725,0	3,88	0,74	0,99	1,82	0,75	2,78	8533,3	10315,8	1782,5
10451	94	9413,7	9326,2	316,7	100273,6	3,36	-0,12	1,96	3,88	-0,13	-0,50	8165,8	10199,2	2033,3
10550	83	9001,1	9021,2	398,4	158749,0	4,43	0,28	0,17	0,32	0,28	1,05	8158,0	10004,7	1846,7
10630	85	9820,7	9884,4	334,1	111627,5	3,40	-0,12	0,20	0,37	-0,12	-0,45	8986,2	10711,9	1725,7
10730	94	9912,7	9955,3	278,9	77805,0	2,81	-0,77	1,06	2,10	-0,78	-3,10	8980,6	10467,7	1487,1
10811	88	9892,7	9920,1	227,8	51873,4	2,30	-0,91	2,36	4,52	-0,92	-3,53	8970,9	10369,1	1398,2
10951	85	9810,9	9861,7	318,2	101267,2	3,24	-0,91	1,18	2,22	-0,92	-3,48	8699,0	10390,2	1691,2
11350	85	8769,3	8804,0	179,6	32245,1	2,05	-0,06	1,18	2,22	-0,06	-0,23	8271,5	9392,0	1120,5
11451	100	8990,3	9046,4	200,2	40095,4	2,23	-0,85	0,07	0,15	-0,86	-3,53	8466,4	9312,8	846,4
11530	56	8916,2	8953,7	144,3	20819,9	1,62	-0,76	-0,06	-0,09	-0,78	-2,38	8567,6	9139,7	572,1
11631	84	9296,5	9333,2	298,4	89015,7	3,21	-0,45	-0,01	-0,03	-0,46	-1,70	8326,3	9820,8	1494,5
11751	78	9274,9	9321,3	218,6	47807,3	2,36	-0,35	-0,50	-0,91	-0,36	-1,29	8762,5	9716,0	953,6
11850	82	9098,7	9134,7	216,0	46664,7	2,37	-0,38	0,55	1,01	-0,39	-1,43	8569,8	9672,8	1103,0
11931	76	9613,1	9645,5	193,0	37259,6	2,01	-0,57	-0,05	-0,10	-0,59	-2,09	9053,2	10009,5	956,3
12010	96	9831,9	9891,0	241,3	58239,6	2,45	-1,12	1,81	3,61	-1,14	-4,56	8952,7	10200,0	1247,3
12111	93	10074,3	10078,2	224,5	50387,1	2,23	-0,69	0,59	1,17	-0,70	-2,75	9415,3	10548,5	1133,1
12211	82	9944,5	10007,9	269,0	72368,7	2,71	-0,56	-0,31	-0,58	-0,57	-2,11	9245,0	10422,1	1177,1
12351	197	8652,4	8689,0	226,9	51466,6	2,62	-0,55	-0,33	-0,95	-0,55	-3,16	7969,6	9068,6	1099,0
12451	199	8688,0	8705,0	195,5	38222,4	2,25	-0,27	-0,47	-1,36	-0,27	-1,58	8198,1	9174,0	975,9
12550	205	8661,7	8691,4	242,6	58876,4	2,80	-0,16	-0,07	-0,20	-0,16	-0,92	7999,9	9394,4	1394,5
12650	211	8627,9	8650,5	224,0	50193,9	2,60	-0,29	0,18	0,53	-0,29	-1,74	7939,7	9260,6	1320,9
12751	20	9268,6	9357,4	292,3	85431,2	3,15	-0,69	-0,42	-0,38	-0,75	-1,37	8739,7	9699,1	959,4
12851	20	9345,0	9336,3	247,2	61083,2	2,64	-0,30	0,55	0,51	-0,32	-0,58	8756,1	9823,0	1066,9
12930	211	9277,7	9314,7	236,9	56099,5	2,55	-0,40	-0,26	-0,78	-0,41	-2,41	8587,3	9847,0	1259,7
13010	198	9769,8	9812,0	217,8	47424,7	2,23	-0,71	0,48	1,36	-0,72	-4,11	9050,4	10176,4	1126,0
13551	171	9108,6	9151,4	211,6	44794,4	2,32	-0,68	-0,58	-1,56	-0,69	-3,67	8528,8	9389,0	860,2
13651	201	9165,8	9191,7	195,2	38092,8	2,13	-0,83	-0,20	-0,59	-0,83	-4,82	8666,3	9445,4	779,1
13730	86	9839,2	9872,3	176,7	31213,4	1,80	-0,34	-0,21	-0,40	-0,34	-1,29	9364,1	10198,0	833,9
13810	85	9959,1	9994,4	189,3	35842,4	1,90	-0,30	-0,90	-1,70	-0,31	-1,16	9439,0	10240,8	801,8
13951	140	9043,7	9089,8	205,4	42206,5	2,27	-0,52	-0,67	-1,62	-0,53	-2,54	8560,0	9425,8	865,8
14050	139	9182,6	9211,8	217,9	47487,2	2,37	-0,22	-0,17	-0,40	-0,22	-1,07	8600,6	9616,6	1016,0
14150	161	9092,4	9137,8	219,7	48261,8	2,42	-0,52	0,33	0,86	-0,52	-2,70	8410,2	9584,7	1174,6
14231	137	9152,5	9195,3	207,9	43224,7	2,27	-0,95	0,26	0,63	-0,96	-4,57	8647,5	9484,7	837,2
14310	137	10110,2	10170,3	191,5	36668,1	1,89	-0,61	-0,54	-1,30	-0,62	-2,95	9686,9	10453,1	766,2
14451	193	9039,8	9069,8	195,3	38130,1	2,16	-0,61	-0,35	-1,00	-0,62	-3,51	8485,5	9349,1	863,6
14551	179	9240,2	9287,8	200,0	39988,4	2,16	-0,79	-0,15	-0,41	-0,80	-4,37	8686,4	9552,1	865,7
14630	196	9592,0	9612,5	201,7	40700,1	2,10	-0,29	-0,41	-1,16	-0,29	-1,66	9052,4	10085,7	1033,4
14730	173	9908,2	9930,8	214,9	46199,2	2,17	-0,62	-0,18	-0,48	-0,63	-3,36	9276,7	10278,9	1002,2
14810	180	10415,4	10457,4	188,5	35529,8	1,81	-0,73	-0,11	-0,30	-0,73	-4,02	9855,4	10721,1	865,7
14951	325	8993,2	9047,1	202,9	41179,8	2,26	-0,80	-0,07	-0,27	-0,80	-5,91	8399,4	9305,3	905,9
15051	320	9167,7	9210,0	212,8	45299,1	2,32	-0,75	0,11	0,39	-0,75	-5,48	8485,8	9546,3	1060,5
15130	327	9403,6	9460,6	210,1	44131,5	2,23	-0,85	0,11	0,42	-0,85	-6,31	8788,5	9755,9	967,4
15210	322	10295,5	10335,8	196,9	38764,6	1,91	-0,60	-0,29	-1,06	-0,61	-4,44	9726,4	10654,0	927,6
15310	323	10064,9	10109,1	200,5	40186,3	1,99	-0,90	0,22	0,82	-0,90	-6,61	9503,5	10429,2	925,7

E.3. Análisis descriptivo casos combinados

Tabla E.5. Resumen estadístico casos combinados 2 y 3.

Parámetro	Caso 2			Caso 3		
	k	D ₁	D ₂	k	D ₁	D ₂
No de datos	2675	2675	2675	3900	3900	3900
Media	0,424	0,512	9504,3	0,500	0,508	9328,3
Mediana	0,413	0,521	9446,0	0,472	0,511	9238,8
Desviación estándar	0,218	0,231	477,2	0,245	0,230	583,9
Varianza	0,047	0,053	227721,5	0,060	0,053	340997,2
Coeficiente de variación	51,4	45,1	5,0	49,0	45,2	6,3
Coeficiente de asimetría	0,283	-0,048	-0,023	0,283	-0,034	0,424
Curtosis	-0,861	-1,068	-0,966	-0,825	-1,190	-0,582
Curtosis estandarizada	-9,089	-11,275	-10,201	-10,519	-15,173	-7,423
Sesgo	0,283	-0,048	-0,023	0,283	-0,034	0,425
Sesgo estandarizado	5,970	-1,010	-0,488	7,218	-0,860	10,826
Mínimo	0,100	0,018	8158,0	0,100	0,020	7939,7
Máximo	0,982	0,993	10711,9	1,300	0,988	10721,1
Rango	0,882	0,976	2553,9	1,200	0,969	2781,4

Tabla E.6. Resumen estadístico casos combinados 11 y 12.

Parámetro	Caso 11			Caso 12		
	k	D ₁	D ₂	k	D ₁	D ₂
No de datos	682	682	682	922	922	922
Media	0,378	0,510	9996,7	0,635	0,499	10147,5
Mediana	0,385	0,525	10023,5	0,620	0,499	10176,3
Desviación estándar	0,236	0,237	240,3	0,180	0,222	308,3
Varianza	0,056	0,056	57748,8	0,032	0,049	95076,3
Coeficiente de variación	62,4	46,4	2,4	28,4	44,6	3,0
Coeficiente de asimetría	0,284	-0,041	-0,853	0,489	0,004	-0,499
Curtosis	-1,364	-1,100	0,919	-0,819	-1,162	-0,233
Curtosis estandarizada	-7,270	-5,862	4,901	-5,075	-7,203	-1,442
Sesgo	0,285	-0,041	-0,855	0,490	0,004	-0,500
Sesgo estandarizado	3,039	-0,436	-9,113	6,069	0,052	-6,202
Mínimo	0,100	0,037	8952,7	0,296	0,039	9050,4
Máximo	0,981	0,986	10548,5	1,000	0,894	10721,1
Rango	0,881	0,949	1595,7	0,703	0,854	1670,7

Tabla E.7. Resumen estadístico casos combinados 17 y 18.

Parámetro	Caso 17			Caso 18		
	k	D ₁	D ₂	k	D ₁	D ₂
No de datos	729	729	729	957	957	957
Media	0,553	0,512	9668,8	0,441	0,504	9417,6
Mediana	0,609	0,507	9735,3	0,432	0,513	9432,8
Desviación estándar	0,230	0,234	399,2	0,265	0,231	285,1
Varianza	0,053	0,055	159345,9	0,070	0,054	81286,7
Coeficiente de variación	41,7	45,7	4,1	60,0	45,9	3,0
Coeficiente de asimetría	-0,414	-0,011	-0,566	0,267	-0,027	-0,173
Curtosis	-0,735	-1,063	-0,214	-1,350	-1,199	-0,010
Curtosis estandarizada	-4,053	-5,859	-1,178	-8,528	-7,572	-0,061
Sesgo	-0,414	-0,011	-0,567	0,268	-0,027	-0,173
Sesgo estandarizado	-4,568	-0,120	-6,253	3,383	-0,340	-2,186
Mínimo	0,100	0,018	8326,3	0,100	0,096	8587,3
Máximo	0,981	0,993	10711,9	0,999	0,973	10198,0
Rango	0,881	0,976	2385,6	0,899	0,877	1610,7

Tabla E.8. Resumen estadístico casos combinados 26 y 27.

Parámetro	Caso 26			Caso 27		
	k	D ₁	D ₂	k	D ₁	D ₂
No de datos	1264	1264	1264	2021	2021	2021
Media	0,373	0,512	9143,8	0,466	0,514	8912,3
Mediana	0,355	0,523	9167,0	0,419	0,516	8919,9
Desviación estándar	0,163	0,225	287,3	0,239	0,232	305,2
Varianza	0,027	0,051	82513,5	0,057	0,054	93161,0
Coefficiente de variación	43,7	44,0	3,1	51,2	45,2	3,4
Coefficiente de asimetría	0,516	-0,075	-0,017	0,665	-0,057	-0,284
Curtosis	-0,011	-1,058	1,055	-0,377	-1,199	-0,454
Curtosis estandarizada	-0,077	-7,679	7,653	-3,461	-11,002	-4,167
Sesgo	0,516	-0,075	-0,017	0,665	-0,057	-0,285
Sesgo estandarizado	7,492	-1,092	-0,242	12,212	-1,043	-5,224
Mínimo	0,100	0,021	8158,0	0,101	0,020	7939,7
Máximo	0,982	0,991	10315,8	1,300	0,988	9823,0
Rango	0,882	0,970	2157,8	1,200	0,969	1883,3

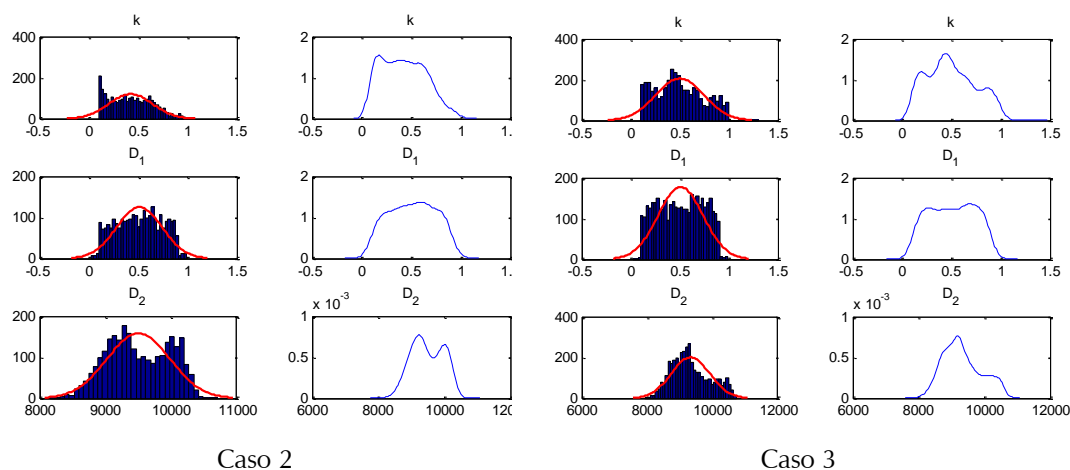


Figura E.1. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 2 y 3.

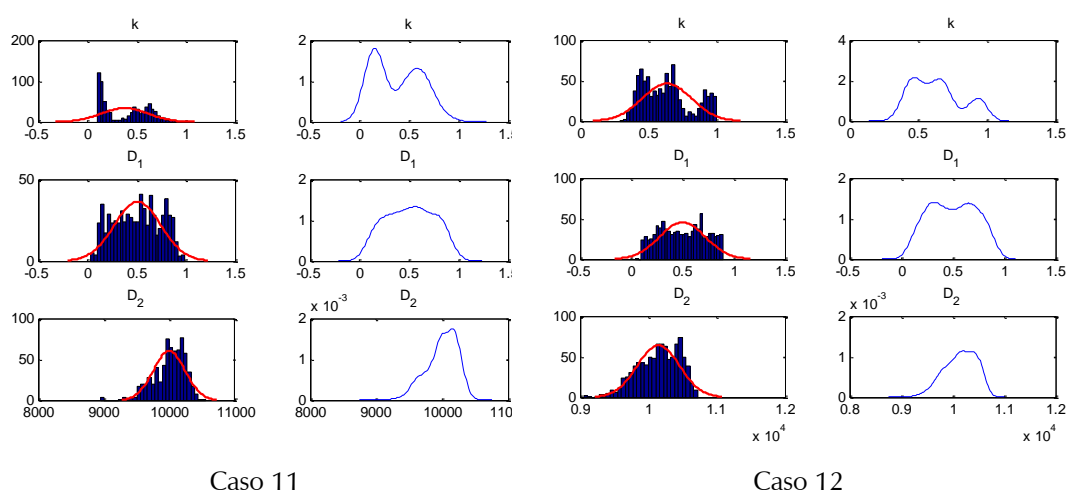


Figura E.2. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 11 y 12.

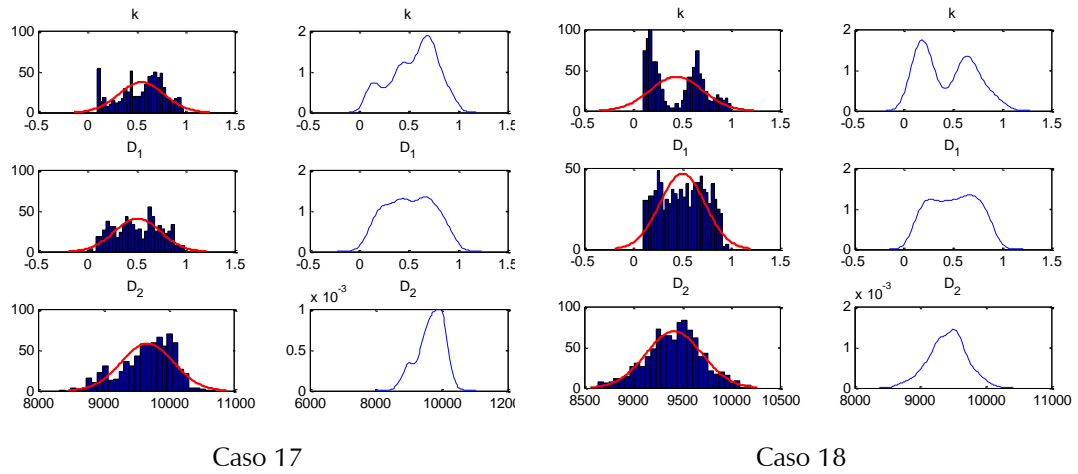


Figura E.3. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. Casos 17 y 18.

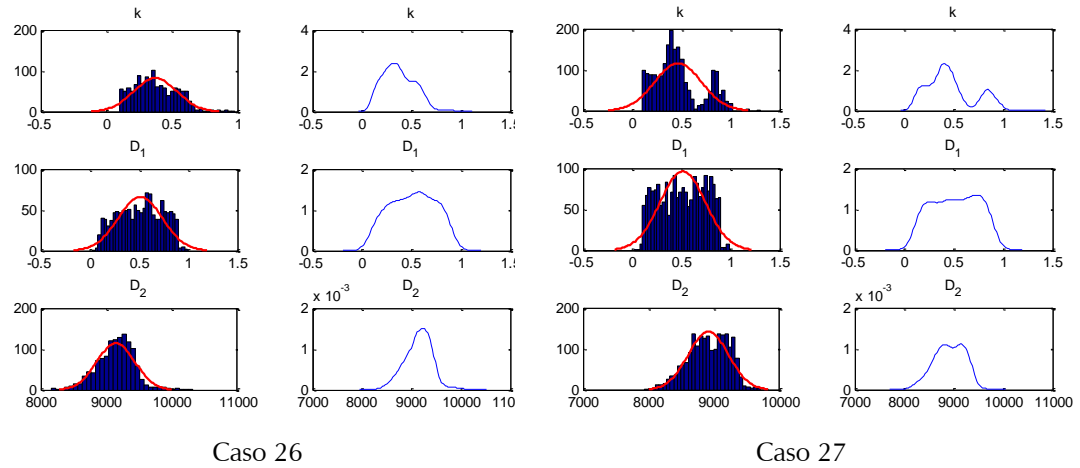


Figura E.4. Histograma y gráfico de densidad suavizada casos combinados. (a) caso26., (b) caso 27.

Tabla E.9. Valores de la mediana de todos los casos combinados.

Caso No	No datos	Medianas		
		k	D ₁	D ₂
1	6575	0,451	0,516	9317,5
2	2675	0,413	0,521	9446,0
3	3900	0,472	0,511	9238,8
4	3617	0,462	0,518	9611,9
5	2958	0,442	0,513	9164,0
6	1320	0,263	0,523	9681,7
7	1355	0,466	0,519	9369,1
8	2297	0,521	0,512	9585,1
9	1603	0,417	0,511	9025,3
10	1604	0,543	0,509	10105,9
11	682	0,385	0,525	10023,5
12	922	0,620	0,499	10176,3
13	1341	0,507	0,510	10133,5
14	263	0,623	0,488	10004,2
15	419	0,158	0,543	10059,2
16	1686	0,548	0,509	9524,7
17	729	0,609	0,507	9735,3
18	957	0,432	0,513	9432,8
19	1228	0,612	0,506	9560,6
20	458	0,366	0,517	9408,5
21	408	0,661	0,512	9883,5
22	321	0,444	0,500	9580,8
23	820	0,565	0,500	9483,4
24	137	0,198	0,545	9195,3
25	3285	0,397	0,519	9041,4
26	1264	0,355	0,523	9167,0
27	2021	0,419	0,516	8919,9
28	1048	0,329	0,540	8890,3
29	2237	0,433	0,513	9084,9
30	493	0,239	0,519	9068,4
31	771	0,417	0,524	9232,0
32	555	0,382	0,550	8739,3
33	1466	0,440	0,509	8996,0

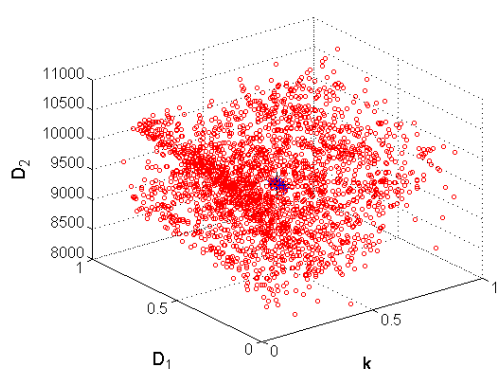
E.4. Análisis multivariante

Tabla E.10. Mediana multivariante, casos individuales

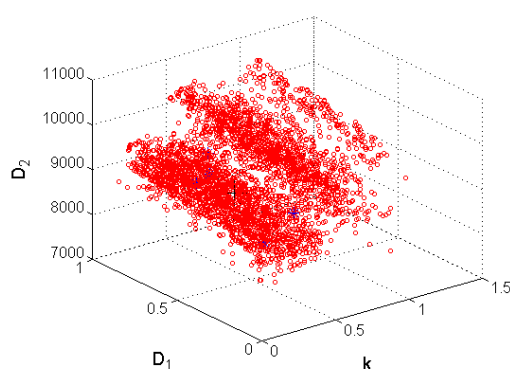
Código	Espesor (mm)	Tipo de papel	No datos	k	D ₁	D ₂
10231	3	Nuevo	76	0,401	0,664	9684,8
10350	5	Nuevo	82	0,275	0,562	9294,7
10451	5	Nuevo	94	0,595	0,477	9519,8
10550	5	Nuevo	83	0,338	0,584	9066,2
10630	3	Nuevo	85	0,667	0,386	9861,4
10730	3	Nuevo	94	0,706	0,666	10090,5
10811	1	Nuevo	88	0,518	0,400	9866,2
10951	3	Nuevo	85	0,842	0,580	9967,2
11350	5	Nuevo	85	0,157	0,464	8699,8
11451	5	Nuevo	100	0,493	0,702	9122,1
11530	3	Nuevo	56	0,105	0,676	8973,6
11631	3	Nuevo	84	0,422	0,629	9492,8
11751	5	Nuevo	78	0,367	0,611	9346,6
11850	5	Nuevo	82	0,271	0,398	9059,4
11931	3	Nuevo	76	0,448	0,659	9700,2
12010	1	Nuevo	96	0,525	0,489	9886,6
12111	1	Nuevo	93	0,646	0,417	9986,8
12211	1	Nuevo	82	0,664	0,565	10070,4
12351	5	Envejecido	197	0,480	0,583	8761,1
12451	5	Envejecido	199	0,335	0,716	8764,5
12550	5	Envejecido	205	0,409	0,725	8834,2
12650	5	Envejecido	211	0,374	0,695	8740,1
12751	5	Envejecido	20	0,964	0,630	9390,2
12851	5	Envejecido	20	0,985	0,489	9262,2
12930	3	Envejecido	211	0,627	0,655	9405,7
13010	1	Envejecido	198	0,608	0,552	9834,1
13551	5	Envejecido	171	0,857	0,391	9027,3
13651	5	Envejecido	201	0,849	0,455	9118,5
13730	3	Envejecido	86	0,861	0,489	9802,6
13810	1	Envejecido	85	0,646	0,433	9950,8
13951	5	Envejecido	140	0,400	0,629	9130,9
14050	5	Envejecido	139	0,456	0,344	9138,4
14150	5	Nuevo	161	0,326	0,570	9193,2
14231	3	Envejecido	137	0,246	0,343	9082,5
14310	1	Envejecido	137	0,663	0,450	10071,7
14451	5	Envejecido	193	0,413	0,451	9017,7
14551	5	Nuevo	179	0,566	0,552	9288,6
14630	3	Envejecido	196	0,666	0,451	9617,8
14730	3	Nuevo	173	0,714	0,612	10033,9
14810	1	Envejecido	180	0,913	0,567	10471,8
14951	5	Envejecido	325	0,165	0,617	9091,1
15051	5	Nuevo	320	0,355	0,588	9296,0
15130	3	Envejecido	327	0,216	0,544	9504,5
15210	1	Envejecido	322	0,483	0,687	10458,8
15310	1	Nuevo	323	0,141	0,437	10010,8

Tabla E.11. Valores de la mediana multivariante de todos los casos combinados.

Caso No	No datos	Medianas		
		k	D ₁	D ₂
1	6575	0,325	0,631	9162,8
2	2675	0,514	0,580	9283,4
3	3900	0,378	0,493	9052,1
4	3617	0,208	0,319	9285,2
5	2958	0,362	0,527	9034,0
6	1320	0,635	0,649	9940,8
7	1355	0,520	0,548	9261,2
8	2297	0,440	0,439	9581,4
9	1603	0,764	0,459	9072,0
10	1604	0,572	0,514	9981,7
11	682	0,542	0,485	9914,6
12	922	0,566	0,575	9819,3
13	1341	0,561	0,396	9838,6
14	263	0,669	0,566	10086,0
15	419	0,146	0,733	10214,9
16	1686	0,328	0,533	9342,2
17	729	0,651	0,527	9886,8
18	957	0,595	0,613	9373,9
19	1228	0,637	0,503	9758,1
20	458	0,246	0,501	9203,6
21	408	0,712	0,600	10015,2
22	321	0,415	0,633	9489,8
23	820	0,598	0,540	9327,4
24	137	0,246	0,343	9082,5
25	3285	0,372	0,517	9048,3
26	1264	0,516	0,515	9230,1
27	2021	0,440	0,454	8694,8
28	1048	0,347	0,629	8684,2
29	2237	0,390	0,511	9052,7
30	493	0,198	0,608	8910,6
31	771	0,575	0,467	9258,3
32	555	0,421	0,598	8770,4
33	1466	0,406	0,506	8928,5



Caso 2



Caso 3

Figura E.5. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 2 y 3.

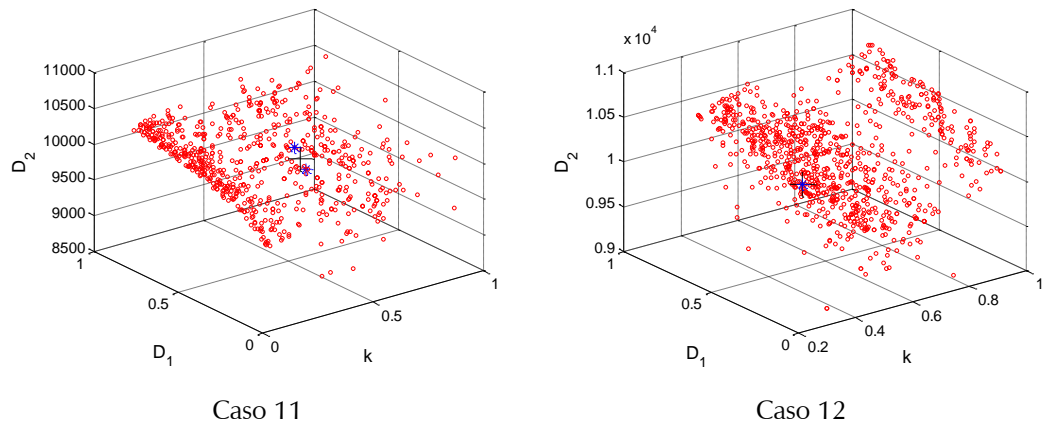


Figura E.6. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 11 y 12.

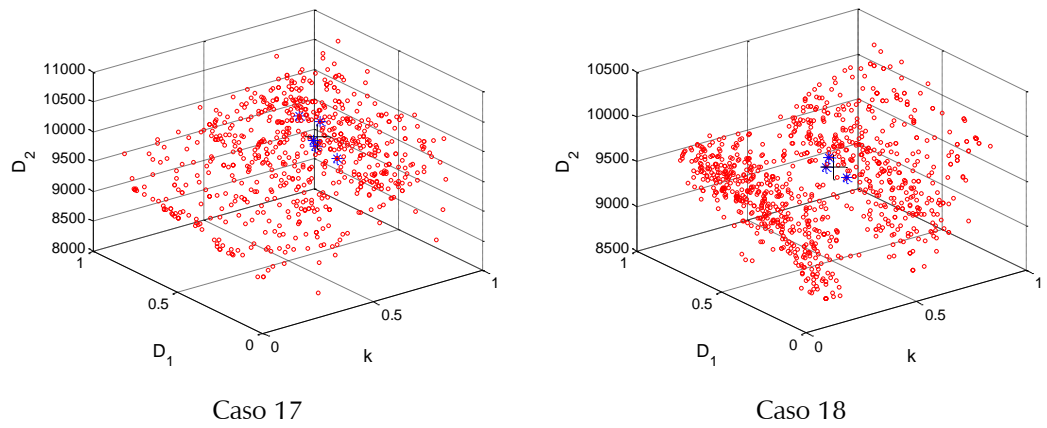


Figura E.7. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 17 y 18.

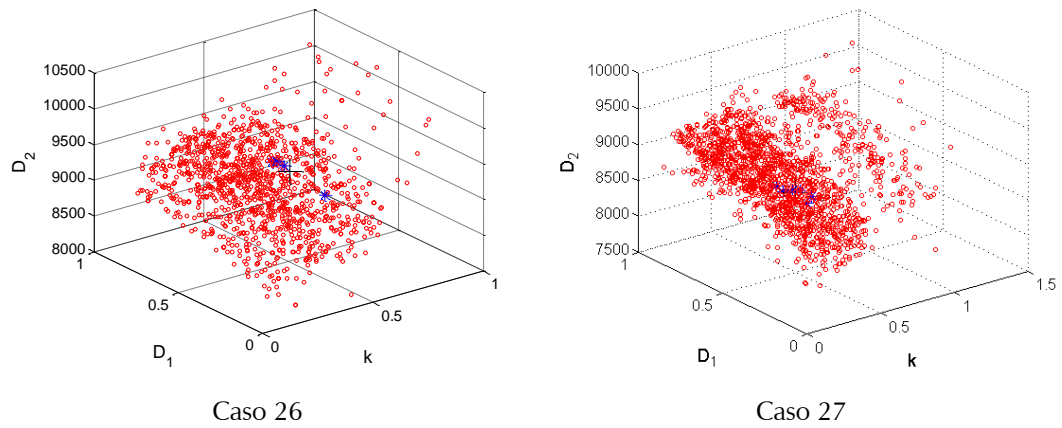


Figura E.8. Nube de puntos y mediana multivariante casos combinados. Casos 26 y 27.

E.5. Cálculo de D_2 , $D_1 = 0,5$ y $k = 0,5$

Tabla E.12. Medidas de posición y dispersión de D_2 para cada espécimen de prueba, cuando k y D_1 se fijan en 0,5

Código	Espesor (mm)	Tipo de papel	No datos	Media	Mediana	D. std	Varianza	C. de var	Rango
10231	3	Nuevo	43	9735,6	9739,8	28,2	796,2	0,290	132,7
10350	5	Nuevo	41	9589,5	9589,2	28,8	832,3	0,301	130,5
10451	5	Nuevo	44	9396,5	9399,9	25,3	641,6	0,270	129,7
10550	5	Nuevo	42	9223,9	9221,5	29,5	869,7	0,320	155,5
10630	3	Nuevo	42	9723,8	9726,3	22,3	499,4	0,230	97,8
10730	3	Nuevo	44	9721,6	9720,2	22,3	496,0	0,229	135,7
10811	1	Nuevo	45	9938,8	9941,0	22,1	490,1	0,223	99,9
10951	3	Nuevo	42	9428,2	9432,2	31,1	965,0	0,329	155,3
11350	5	Nuevo	42	9188,9	9188,8	20,8	432,7	0,226	98,9
11451	5	Nuevo	41	9016,9	9010,4	24,7	608,9	0,274	111,6
11530	3	Nuevo	45	9417,6	9420,7	18,4	339,1	0,196	98,7
11631	3	Nuevo	43	9527,2	9532,1	31,5	992,0	0,331	170,1
11751	5	Nuevo	41	9455,4	9458,2	27,7	768,2	0,293	123,9
11850	5	Nuevo	43	9456,6	9457,0	20,3	411,9	0,215	104,9
11931	3	Nuevo	41	9682,9	9679,5	18,7	351,0	0,193	72,2
12010	1	Nuevo	45	9902,3	9898,9	25,9	669,5	0,261	129,0
12111	5	Envejecido	42	8745,7	8750,6	31,3	978,5	0,358	158,6
12211	5	Envejecido	42	8825,5	8826,2	22,6	509,0	0,256	102,6
12351	5	Envejecido	42	8804,2	8800,0	26,0	677,2	0,296	104,8
12451	5	Envejecido	44	8753,5	8756,3	26,2	686,6	0,299	174,0
12550	5	Envejecido	43	8868,6	8873,5	24,8	614,8	0,280	122,8
12650	5	Envejecido	41	8847,9	8844,1	22,8	518,6	0,257	107,9
12751	3	Envejecido	42	9203,7	9202,1	34,1	1160,6	0,370	171,3
12851	1	Envejecido	43	9708,7	9710,4	27,0	727,6	0,278	120,5
12930	5	Envejecido	41	8831,3	8832,5	31,1	966,8	0,352	142,5
13010	5	Envejecido	42	8829,9	8832,0	24,9	621,8	0,282	92,4
13551	3	Envejecido	42	9333,8	9336,7	28,4	804,7	0,304	139,7
13651	1	Envejecido	43	9856,1	9866,1	23,7	561,0	0,240	131,0
13730	5	Envejecido	43	9156,9	9162,2	27,6	760,7	0,301	149,7
13810	5	Envejecido	44	9344,7	9345,4	21,5	463,4	0,230	98,5
13951	1	Nuevo	43	9934,5	9928,4	23,7	562,1	0,239	96,8
14050	3	Envejecido	45	9490,5	9491,7	30,0	900,3	0,316	165,1
14150	1	Envejecido	43	9957,2	9956,3	24,2	585,0	0,243	116,8
14231	5	Envejecido	41	9160,1	9157,8	20,1	402,0	0,219	93,6
14310	1	Nuevo	41	9870,5	9874,3	26,9	725,1	0,273	121,6
14451	3	Envejecido	44	9495,6	9494,9	22,5	507,7	0,237	122,1
14551	5	Nuevo	43	9380,8	9379,7	21,2	447,6	0,226	116,1
14630	1	Envejecido	43	10012,9	10013,6	20,8	431,6	0,207	94,6
14730	5	Envejecido	43	9325,7	9332,4	23,3	543,0	0,250	109,3
14810	5	Nuevo	42	9211,9	9211,6	34,9	1219,6	0,379	168,0
14951	3	Envejecido	41	9810,2	9812,7	24,4	594,9	0,249	165,6
15051	1	Envejecido	43	10379,1	10376,2	25,2	635,8	0,243	112,9
15130	3	Nuevo	40	9675,8	9674,9	23,3	540,8	0,240	123,4
15210	5	Nuevo	43	9392,7	9394,7	26,6	708,1	0,283	138,4
15310	1	Nuevo	41	10506,3	10508,3	22,3	495,8	0,212	86,5

Tabla E.13. Valor de la mediana de D2 para los casos combinados, cuando se fijan k y D1 en 0,5

Caso No	Descripción	Código espécimen	No datos por espécimen	Datos Totales	Mediana
2	papeles nuevos de todos los espesores, se excluyen los datos del espécimen 15310	10231	43	936	9495,4
		10350	41		
		10451	44		
		10550	42		
		10630	42		
		10730	44		
		10811	45		
		10951	42		
		11350	42		
		11451	41		
		11530	45		
		11631	43		
		11751	41		
		11850	43		
		11931	41		
		12010	45		
		12111	43		
		12211	41		
		14150	43		
		14551	42		
		14730	40		
		15051	43		
3	Papeles envejecidos de todos los espesores, Se excluyen los datos de los especímenes 15130 y 15210	12351	42	853	9188,5
		12451	42		
		12550	42		
		12650	44		
		12751	43		
		12851	41		
		12930	42		
		13010	43		
		13551	41		
		13651	42		
		13730	42		
		13810	43		
		13951	43		
		14050	44		
		14231	45		
		14310	43		
		14451	41		
		14630	44		
		14810	43		
		14951	43		
11	Papeles nuevos de 1 mm. Se excluyen los datos del espécimen 15310	10811	45	174	9913,7
		12010	45		
		12111	43		
		12211	41		
12	Papeles envejecidos de 1 mm, excluyendo los datos del espécimen 15210	13010	43	172	9906,7
		13810	43		
		14310	43		
		14810	43		

Tabla E.14. Valor de la mediana de D_2 para los casos combinados, cuando se fijan k y D_1 en 0,5

Caso No	Descripción	Código espécimen	No datos por espécimen	Datos Totales	Mediana
17	Papeles nuevos de 3 mm	10231	43	340	9675,1
		10630	42		
		10730	44		
		10951	42		
		11530	45		
		11631	43		
		11931	41		
		14730	40		
18	Papeles envejecidos de 3mm. Se excluyen los datos del espécimen 15130	12930	42	173	9441,6
		13730	42		
		14231	45		
		14630	44		
26	Papeles nuevos de 5 mm	10350	41	422	9379,1
		10451	44		
		10550	42		
		11350	42		
		11451	41		
		11751	41		
		11850	43		
		14150	43		
		14551	42		
27	Papeles envejecidos de 5 mm	15051	43	508	8848
		12351	42		
		12451	42		
		12550	42		
		12650	44		
		12751	43		
		12851	41		
		13551	41		
		13651	42		
		13951	43		
		14050	44		
		14451	41		
		14951	43		